

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЦЕНТР им. А.А. Дородницына

---

**50 лет ВЦ РАН:  
ИСТОРИЯ, ЛЮДИ, ДОСТИЖЕНИЯ**



Вычислительный центр им. А.А. Дородницына  
Российской академии наук

Москва 2005

УДК [51+53+004] (06)

**50 лет ВЦ РАН: история, люди, достижения.**

— М.: ВЦ РАН, 2005. — 320 с.

ISBN 5-201-09837-1

В 2005 году Вычислительному центру им. А.А. Дородницына Российской академии наук исполнилось 50 лет.

Сборник содержит статьи, отражающие историю создания и развития Института, его подразделений. В нем представлены наиболее важные достижения и результаты, полученные за эти годы.

**Редколлегия**

Главные редакторы: член-корр. РАН *Ю. Г. Евтушенко*,  
канд. физ.-матем. наук *С. Л. Скороходов*

Члены редколлегии: академик РАН *Ю. И. Журавлев*,  
канд. физ.-матем. наук *Г. М. Михайлов*,  
доктор физ.-матем. наук *Б. В. Пальцев*,  
академик РАН *А. А. Петров*,  
член-корр. РАН *Ю. А. Флеров*,  
доктор физ.-матем. наук *Ю. Д. Шмыглевский*,  
канд. филол. наук *Н. П. Петрова*

**Компьютерная верстка**

*Е. А. Королевой*

*Научное издание*

ISBN 5-201-09837-1

© Вычислительный центр им. А.А. Дородницына  
Российской академии наук, 2005

## СОДЕРЖАНИЕ

50 ЛЕТ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОМУ ЦЕНТРУ ИМ. А.А. ДОРОДНИЦЫНА РАН. <i>Ю.Г. Евтушенко, М.К. Керимов</i> .....	5
50 ЛЕТ ИСТОРИИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ: ОТ “СТРЕЛЫ” ДО КЛАСТЕРНЫХ РЕШЕНИЙ. <i>Ю.Г. Евтушенко, Г.М. Михайлов, М.А. Копытов, Ю.П. Рогов</i> .....	16
АНАТОЛИЙ АЛЕКСЕЕВИЧ ДОРОДНИЦЫН (из воспоминаний <i>П.И. Чушкина</i> ). .....	37
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОМУ ЦЕНТРУ 25 ЛЕТ. <i>А.А. Дородницын</i> .....	42
НИКИТА НИКОЛАЕВИЧ МОИСЕЕВ. <i>А.А. Петров</i> .....	45
ОТДЕЛ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МЕТОДОВ. <i>А.А. Абрамов, А.И. Александрович, Н.Б. Конюхова, Б.В. Пальцев</i> .....	53
ОТДЕЛ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ. РАЗРАБОТКА ВЫСОКОТОЧНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ОТДЕЛЕ. <i>А.И. Толстых</i> .....	81
ОТДЕЛ МЕХАНИКИ СПЛОШНЫХ СРЕД. <i>В.И. Жук, В.Н. Котеров, В.П. Пархоменко, А.А. Чарахчьян, Ю.Д. Шмыглевский</i> .....	89
ОТДЕЛ СИСТЕМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ. <i>В.А. Серебряков, С.А. Абрамов, А.И. Срагович, В.И. Филиппов</i> .....	115
ОТДЕЛ МЕХАНИКИ. <i>В.В. Аристов, С.Я. Степанов</i> .....	128
ОТДЕЛ ПРОБЛЕМ МОДЕЛИРОВАНИЯ. <i>А.П. Абрамов, П.П. Корявов</i> .....	138
ОТДЕЛ МЕТОДОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ РАЗВИВАЮЩИХСЯ СИСТЕМ. <i>В.Р. Хачатуров, Г.С. Булгакова, В.Е. Веселовский, А.В. Зотов, И.А. Крылов</i> .....	150
ОТДЕЛ ИССЛЕДОВАНИЯ ОПЕРАЦИЙ. <i>Ю.Е. Малащенко</i> .....	155
ОТДЕЛ ПРИКЛАДНЫХ ПРОБЛЕМ ОПТИМИЗАЦИИ. <i>Ю.Г. Евтушенко, В.Г. Жадан</i> .....	165
ОТДЕЛ МАТЕМАТИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ РАСПОЗНАВАНИЯ И МЕТОДОВ КОМБИНАТОРНОГО АНАЛИЗА. ОТДЕЛ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МЕТОДОВ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ. <i>Ю.И. Журавлев, К.В. Рудаков</i> .....	175
ОТДЕЛ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ПРИКЛАДНЫХ СИСТЕМ. <i>А.Н. Аверкин, С.К. Дулин, В.Ф. Хорошевский, А.И. Эрлих</i> .....	198
ОТДЕЛ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ. <i>В.И. Цурков</i> .....	212
ОТДЕЛ НАУЧНОЙ ИНФОРМАЦИИ. <i>С.И. Гусев, Е.Г. Козлова, Е.И. Моисеев, А.А. Муромский, Н.П. Петрова, Н.П. Тучкова</i> .....	219
ОТДЕЛ МЕТОДОВ НЕЛИНЕЙНОГО АНАЛИЗА. <i>А.З. Ишимухаметов</i> .....	239

20 ЛЕТ ОТДЕЛУ НАДЕЖНОСТИ, УСТОЙЧИВОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ СИСТЕМ. ИСТОРИЯ СОЗДАНИЯ. <i>Н.А. Северцев</i> .....	243
ОТДЕЛ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМ ПРОЕКТИРОВАНИЯ. <i>Л.Л. Вышинский, Ю.А. Флеров, М.Г. Фурегян</i> .....	248
ОТДЕЛ ИМИТАЦИОННЫХ СИСТЕМ. <i>Ю.Н. Павловский</i> .....	273
ОТДЕЛ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ. <i>А.А. Белолипецкий</i> .....	285
ОТДЕЛ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМ. <i>А.А. Петров</i> .....	294
ОТДЕЛ ИНФОРМАЦИОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ. <i>Ф.И. Ерешко</i> .....	310

## 50 ЛЕТ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОМУ ЦЕНТРУ ИМ. А.А. ДОРОДНИЦЫНА РАН

*Ю.Г. Евтушенко, М.К. Керимов*

---

Вычислительный центр Академии наук СССР, ныне называемый Вычислительным центром им. А.А. Дородницына Российской академии наук (ВЦ РАН), отмечает свое пятидесятилетие. Созданный в 1955 г. как Всесоюзный головной вычислительный центр страны, он предназначался для проведения масштабных вычислений на электронно-вычислительных машинах (которые, кстати, в то время у нас только разрабатывались). Его организатором и первым директором был выдающийся ученый, Герой Социалистического труда, академик Анатолий Алексеевич Дородницын (1910–1994). Он возглавлял институт с 1955 г. по 1989 г.

За прошедшие полвека ВЦ РАН превратился в один из ведущих институтов Академии наук, где проводятся научные исследования по вычислительной математике, механике, кибернетике, математическому моделированию и их приложениям в самых разных областях: проектировании сложных технических систем, моделировании современных процессов в экономике, медицине, экологии. На протяжении многих лет институт тесно сотрудничал с многими научными коллективами и ведущими конструкторскими бюро, возглавляемыми С.А. Лебедевым, А.Н. Туполевым, С.П. Королевым, П.О. Сухим, В.Н. Челомеем, А.М. Люлькой и др.

Наш институт создавался на базе Института точной механики и вычислительной техники Академии наук СССР (ИТМ и ВТ). При организации института из ИТМ и ВТ в ВЦ АН СССР были переведены 205 научно-технических работников. В дальнейшем штат института увеличивался, достигнув в конце 80-х гг. численности 700 человек. В начале 90-х гг. в новых рыночных условиях штат сотрудников стал уменьшаться. Часть специалистов перешла работать в коммерческие структуры, другие выехали на постоянную работу за рубеж, но костяк ВЦ остался верен своему призванию.

В настоящее время в институте трудятся 392 человека, в том числе 276 научных сотрудников, 4 академика и 4 члена-корреспондента РАН, 75 докторов и 136 кандидатов наук. В стенах ВЦ активно работают 7 ведущих научных школ, руководимых Ю.И. Журавлевым, А.А. Петровым, В.В. Румянцевым, Ю.Г. Евтушенко, Ю.Н. Павловским, К.В. Рудаковым, Ю.А. Флеровым.

Институт появился в период могучего подъема экономики и оборонной мощи нашей страны, в период зарождения новой отрасли народного хозяйства — электронно-вычислительной техники, которой предстояло внести существенный вклад в развитие общества. Помимо конструирования и организации промышленного производства ЭВМ необходимо было разрабатывать соответствующее математическое и программное обеспечение, внедрять новые вычислительные методы решения сложных практических задач. Эти последние два направления легли в основу работы нового института.

В трудные послевоенные годы наша страна оказалась в изоляции. Запад не был заинтересован в том, чтобы СССР быстро поднялся из руин Великой Отечественной войны, в результате которой был потерян значительный людской и промышленный потенциал страны. Это было время, когда помимо восстановления промышленности необходимо было развивать оборонную мощь страны, когда решался вопрос не только о восстановлении промышленности, о защите страны и ее народа, но и о привлечении к этой работе всей нашей науки. Поэтому правительство СССР, несмотря на острый недостаток средств, приступило к организации научно-технических центров, работающих в области создания и внедрения вычислительной техники. К таким центрам относился ИТМ и ВТ, организованный в июле 1948 г. В нем инженерные подразделения возглавлял известный ученый, будущий академик АН СССР Сергей Алексеевич Лебедев (1902–1974), впоследствии многие годы проработавший директором ИТМ и ВТ, а ядро математических подразделений составляли Л.А. Люстерник, В.А. Диткин, Д.Ю. Панов, а также сравнительно молодые в те годы талантливые ученые А.А. Абрамов, В.М. Курочкин,

В.П. Черенин и другие. Они составили костяк будущего ВЦ РАН. Первоначальный коллектив ВЦ РАН почти целиком состоял из бывших сотрудников ИТМ и ВТ.

Постановлением № 30 Президиума АН СССР от 14 января 1955 г. был организован ВЦ АН СССР и его директором был назначен академик А.А. Дородницын. На основании этого



*А.А. Дородницын*

Постановления директор издал свой приказ № 1 от 1 сентября 1955 г., в котором извещал о том, что он приступил к исполнению обязанностей директора ВЦ АН СССР. Решением бюро Отделения физико-математических наук от 1 марта 1955 г. была утверждена структура института и назначены первые руководители. Вначале институт состоял только из трех научных подразделений.

В первый год своего существования в институте был создан отдел эксплуатации ЭВМ, который впоследствии стал первым испытательным полигоном для многих отечественных ЭВМ. На протяжении более 30 лет этот отдел выполнял функции центра коллективного пользования, предоставляя дефицитное в те годы машинное время в сотни академических, промышленных и учебных организаций. В течение многих лет это направление возглавляет Г.М. Михайлов. Сотрудники отдела обеспечивали высокий

уровень эксплуатации ЭВМ, оказывали консультационную помощь другим организациям.

Появление первых отечественных ЭВМ превратило ВЦ РАН во всесоюзный центр внедрения вычислительной техники. Сотрудники, работавшие в те годы, помнят, как днем и ночью в институте шла бурная работа, как десятки “заказчиков” ходили по коридорам института, который в то время работал круглосуточно. При создании института из ИТМ и ВТ были получены две первые ЭВМ БЭСМ, а также из Математического института имени В.А. Стеклова машина “Стрела”. На этих сравнительно маломощных ЭВМ сотрудники ВЦ РАН ухитрялись получать рекордные в то время численные результаты, создавать уникальные математические таблицы.

Основными направлениями работы ВЦ АН, как это указано в постановлении № 30 Президиума АН СССР от 14 января 1955 г., являлись:

1) проведение научно-исследовательских работ в области разработки, обобщения и внедрения методов решения математических задач с применением современных средств вычислительной техники;

2) выполнение крупных вычислительных работ, в первую очередь для учреждений АН СССР;

3) изучение эксплуатационных качеств и освоение новых средств вычислительной техники;

4) руководство планированием и вычислением математических таблиц в СССР.

Для выполнения этих задач в ВЦ АН были созданы следующие отделы и технические подразделения:

1) теоретический отдел;

2) отделы универсальных вычислительных машин № 1 и № 2;

3) отдел специальных машин и приборов;

4) отдел счетно-аналитических и клавишных машин;

5) отдел таблиц и номограмм;

6) электролаборатория;

7) библиотека математических таблиц и номограмм;

8) научный архив;

9) фотолаборатория;

10) механические мастерские.

Потребности страны вносили свои коррективы, возникали новые темы исследований. В 1995 г. были выделены следующие четыре основные направления работы института.

1. Решение фундаментальных проблем вычислительной и прикладной математики, разработка численных методов решения задач механики и математической физики, их приложения к различным областям науки и техники, математическое моделирование экологических систем.

2. Информатика и математическая кибернетика, проблемы распознавания образов, оптимизация сложных систем, принятие решений в конфликтных ситуациях, искусственный интеллект и методы комбинаторного анализа, механика сплошных сред, механика твердого тела, теория упругости, динамика полета.

3. Теоретические основы автоматизации проектирования, математическое моделирование экономических процессов.

4. Математическое, алгоритмическое и программное обеспечение ЭВМ, разработка программ широкого назначения.

Одним из важнейших направлений исследований в ВЦ РАН с момента его создания была разработка численных методов математической физики и их применение к решению прикладных задач, и в первую очередь — авиакосмического профиля, что определялось разработкой новых видов авиационной и ракетной техники и освоением космического пространства. Постановлением Президиума АН СССР № 1080 от 16 декабря 1960 г. были организованы лаборатория газовой динамики и лаборатория общей механики и гидродинамики. Эти направления в различные периоды изменялись и дополнялись, но основной их смысл, состоявший в разработке фундаментальных основ вычислительной математики, сохранился неизменным. Это направление возглавлял академик А.А. Дородницын.

Выдающийся советский ученый, лауреат Ленинской и трех Государственных премий А.А. Дородницын внес фундаментальный вклад в различные области науки: в математику, метеорологию, газовую динамику, аэродинамику крыла, теорию пограничного слоя, гидродинамику, теорию нелинейных колебаний, вычислительную математику, информатику. Одним из крупнейших достижений ученого стало комплексное исследование сверхзвуковых потоков газа и создание численных методов их расчета. Была получена каноническая система уравнений газовой динамики и изучены свойства их решений. Им были разработаны методы для расчета обтекания корпусов ракет и самолетов. Среди учеников А.А. Дородницына назовем академика О.М. Белоцерковского, члена-корреспондента В.В. Сычева, д.ф.-м.н. П.И. Чушкина и проф. Ю.Д. Шмыглевского, внесших значительный вклад в дальнейшее развитие вычислительной аэродинамики.

Большое влияние на жизнь института оказал Н.Н. Моисеев (1917–2000). Благодаря его плодотворной, активной научной и организационной деятельности в институте бурно стали развиваться совершенно новые направления исследований, такие как теория и методы оптимизации, теория игр, исследование операций, математическая экономика, моделирование климата и др. В 70-е–80-е гг. мировое признание получили работы коллектива, руководимого Н.Н. Моисеевым и В.В. Александровым, по изучению климатических последствий мировой ядерной войны, которая реально могла возникнуть в те годы. Важнейшим результатом этих работ было открытие эффекта “ядерной зимы”, приводящей к гибели всего человечества. Эти исследования и их результаты докладывались на мировых научных и политических симпозиумах, в Конгрессе США, на встрече с Папой Римским Иоанном Павлом II и способствовали сдерживанию гонки вооружений и сокращению ядерных арсеналов. На протяжении 40 лет работы в ВЦ РАН академик Н.Н. Моисеев создал большую научную школу, собрав вокруг себя многих талантливых ученых.

Крупный ученый в области информатики, дискретной и прикладной математики Ю.И. Журавлев работает в ВЦ РАН с 1969 г. Он получил фундаментальные результаты в области теории алгебраических и логических алгоритмов распознавания и прогнозирования, создания и изучения методов обработки и анализа изображений. Ему принадлежат выдающиеся прикладные результаты в области прогнозирования месторождений полезных ископаемых, медицинской и технической диагностики. Под его руководством и при его непосредственном участии в 2000–2004 гг. созданы современные программные комплексы для задач распознавания образов, обработки и анализа изображений, поддержки принятия решений при неполной и



*Встреча В.В. Александрова с Папой Римским Иоанном Павлом II в Ватикане*

противоречивой информации, создана и внедрена на Межбанковской валютной бирже система анализа финансовых рынков и надзора за ходом торгов, внедрена в Гематологическом научном центре РАМН система ранней диагностики злокачественных заболеваний крови, в РАО ЕЭС России используется система прогнозирования оптимальных цен на электроэнергию при торговле со странами Северной Европы.

Академик Ю.И. Журавлев создал всемирно известную научную школу. Среди его учеников более 100 кандидатов и 26 докторов наук, 2 члена-корреспондента РАН. Он удостоен Ленинской премии, Премии Совета Министров СССР и многих государственных наград.

Академик П.С. Краснощеков возглавил работы по автоматизации проектирования, проводившиеся по заказу ОКБ им. П.О. Сухого. За создание первой очереди систем автоматизации проектирования сложных технических объектов П.С. Краснощеков и руководимый им коллектив были удостоены звания лауреатов премии Совета министров СССР. Эти работы, непосредственно связанные с промышленностью, успешно продолжаются в стенах ВЦ РАН до сих пор. Исследована фундаментальная научная проблема создания и совершенствования теории и методологии решения основной концептуальной задачи параметрического проектирования сложных технических систем — задачи параметрического синтеза облика системы заданного целевого назначения. Развита методика, позволяющая формализовать этап синтеза и тем самым заложить основы математической теории проектирования сложных систем. Получены условия согласованности критериев на различных уровнях иерархии, достаточные для нахождения множества эффективных вариантов в многоуровневых системах автоматизированного проектирования сложных технических объектов, которые могут использоваться для предварительного отсева неперспективных вариантов.

В 1990 г. по инициативе П.С. Краснощекова и А.А. Петрова было организовано Отделение математического моделирования систем и решений. В состав Отделения вошли отделы математического моделирования экономических систем (заведующий — академик РАН А.А. Петров), математического моделирования систем проектирования (заведующий — член-корреспондент РАН Ю.А. Флеров), имитационных систем (заведующий — член-корреспондент РАН Ю.Н. Павловский), математического моделирования технических систем (заведующий — д.ф.-м.н. А.А. Белолипецкий), информационно-вычислительных систем (заведующий — д.т.н. Ф.И. Ерешко).

П.С. Краснощеков вместе с его учеником академиком Г.И. Савиным и чл.-корр. РАН Ю.Н. Павловским провели большую работу по моделированию боевых действий, ими были получены первоклассные результаты в этой области. Разработаны математические модели вооруженной борьбы и технология ее имитации на сети компьютеров. Математические модели



описывают процесс вооруженной борьбы на линии фронта с применением всех видов вооружений, а также действия “дальнобойных” видов вооруженных сил, авиации, ракетных войск, воздушно-десантных и других родов войск. Построенная система моделей дала возможность рассчитывать результаты различных сценариев военных операций, оценивая эффективность тех или иных тактических и оперативных решений, а также боевую эффективность различных систем вооружений и технических средств вооруженной борьбы.

Под руководством академика А.А. Петрова в нашем институте широким фронтом ведутся работы по системному анализу развития экономических систем. В возглавляемом А.А. Петровым коллективе был создан ряд математических моделей экономики СССР и Российской Федерации, качественно объяснивших и количественно описавших всю историю экономических реформ в нашей стране за последние 30 лет. В частности, разработана динамическая модель рынка товара, исследование которой показало, что в зависимости от совершенства инфраструктуры рынка на нем устанавливаются качественно различные состояния равновесия: совершенно конкурентное (при совершенной инфраструктуре) и монопольное (при несовершенной инфраструктуре). Описан и изучен переходный процесс из одного равновесия в другое. Модель качественно объясняет явления на формирующихся российских рынках. Установлена взаимосвязь между свойствами равновесности макроэкономических структур и характером распределения доходов между группами населения. Создана система, позволяющая при наличии необходимой экономической статистики выявлять структуру потребительских корзин, оценивать индекс роста потребительских цен, выявлять макроструктуру распределения населения по доходам.

Предложенные модели позволяют получать важные практические результаты — они успешно применялись в системе Центра экономической конъюнктуры регионального управления ЦБ и Федерального агентства по налогам и сборам. В процессе этих работ создалась научная школа исследования социально-экономических процессов, различные направления которой успешно развивают профессора А.В. Лотов, Н.С. Кукушкин, И.Г. Пospelов, А.А. Шананин.

В 1958 г. под руководством О.М. Белоцерковского была организована группа, из которой впоследствии образовался Отдел вычислительной физики, возглавляемый ныне Л.И. Турчаком. Под научным руководством О.М. Белоцерковского в отделе решались многие важные задачи, в частности

— методом интегральных соотношений впервые была решена прямая задача о сверхзвуковом обтекании затупленных тел с отошедшей ударной волной. Метод в дальнейшем успешно использовался во многих организациях для решения задач аэродинамики и получил широкое международное признание, а академик О.М. Белоцерковский был удостоен звания Лауреата Ленинской премии;

— на основе расщепления алгоритма по физическим процессам разработан метод крупных частиц для исследования широкого класса течений сжимаемого газа (О.М. Белоцерковский, Ю. М. Давыдов);

- решен ряд актуальных задач гиперзвуковой аэродинамики с учетом физико-химических процессов применительно к проблемам движения аппаратов в атмосферах планет (О.М. Белоцерковский, М.М. Голомазов, Л.И. Турчак);

— с помощью сеточно-характеристического метода решен цикл нестационарных задач сверхзвуковой аэродинамики, в том числе при наличии взаимодействия ударных волн (Л.И. Турчак);

— проведены исследования трехмерного пограничного слоя, построена новая математическая модель течения в газовых подшипниках (В.П. Шидловский);

— разработаны эффективные методы статистического моделирования течений разреженного газа, с помощью которых проведен ряд исследований течений вблизи космических аппаратов (А.А. Пярнпуу, В.Е. Яницкий);

— на базе метода дискретных вихрей решен ряд задач динамики летательных аппаратов в условиях аэродинамической интерференции, разработаны модели вихревой безопасности полетов (А.С. Белоцерковский, Л.И. Турчак).

В 1965 г. с приходом в институт В.В. Румянцева начались работы по теории устойчивости движения и аналитической механике. В отделе механики под руководством академика В.В. Румянцева были созданы новые аналитические и численные методы исследования динамики и устойчивости движения космических тел (спутников и ракет), содержащих жидкость

и упругие элементы. Разработана теория устойчивости решений интегро-дифференциальных уравнений типа Вольтерра и в рамках модели С.М. Белоцерковского исследованы колебания крыла с вязкоупругой заделкой в нестационарном потоке газа. Разработана теория систем твердых тел с трением, теория интегрируемости голономных и неголономных систем, а также многие другие задачи. В этой области было опубликовано 6 монографий, значительное количество статей. В 1980 г. Н.Н. Моисееву, А.А. Петрову и В.В. Румянцеву была присуждена Государственная премия за цикл работ по теории движения тел с полостями, содержащими жидкость. В.В. Румянцев создал большую научную школу, под его руководством защищено более 60 кандидатских и 20 докторских диссертаций.

В последние годы в секторе кинетической теории газов (заведующий — д.ф.-м.н. В.В. Аристов) были реализованы новые эффективные параллельные алгоритмы решения задач динамики разреженных газов с декомпозицией как в физическом, так и в скоростном пространствах. Для расчетов применялся кластер ВЦ РАН и многопроцессорные компьютеры Межведомственного суперкомпьютерного центра. С их помощью были успешно решены сложные двумерные и трехмерные задачи кинетической теории и динамики разреженных газов. Рассматривалось обтекание тел различной формы; струйные задачи, которые были исследованы, в частности, в закритическом режиме, и при этом была выявлена структура продольных вихрей типа Гертлера–Тейлора; внутренние задачи, включая течения в каналах. На основе созданных методов решения уравнения Больцмана, а также кинетических схем для решения уравнений сплошной среды, был разработан единый кинетический и континуальный подход. Здесь автоматически определяются границы раздела между областями, где решалось уравнение Больцмана и уравнения сплошной среды. Были использованы адаптивные сетки в физическом пространстве с автоматическим выбором шага. Было построено модельное кинетическое уравнение, учитывающее вращательные степени свободы двухатомных молекул воздуха и на его основе в рамках проекта “Буря” рассчитано тепловое взаимодействие летательного аппарата с гиперзвуковым потоком двухатомного газа. Работы сотрудников сектора в этой области до сих пор остаются одними из самых передовых в мире.

В Отделе прикладной математической физики (заведующий — д.ф.-м.н. А.И. Толстых) для задач механики сплошных сред созданы и апробированы новые численные методы, обладающие высокой точностью аппроксимации.

Сотрудники “Центра суперкомпьютерных и массивно-параллельных приложений” В.Н. Коньшин, В.А. Гаранжа, И.Е. Капорин, И.Н. Коньшин, С.А. Харченко разработали эффективные параллельные решатели для больших линейных систем, а также высокоточные параллельные методы решения задач гидродинамики, электродинамики, упругости, фильтрации. Реальная производительность 1Gf на этих приложениях была достигнута еще в 1995 г. при использовании суперЭВМ. На основе этого опыта уже в 1997 г. В.А. Гаранжа и В.Н. Коньшин начали обучение студентов МФТИ параллельным вычислениям и программированию в стандарте MPI на параллельных кластерах. За последние годы ими были получены новые результаты в области теоретических основ итерационных методов, построения сеток и геометрического моделирования, в частности предложены вариационные методы построения многомерных квази-зометричных отображений. Сотрудники сектора стали инициаторами проведения всероссийских конференций по построению адаптивных сеток. Тексты докладов издавались в специальных тематических номерах ЖВМ и МФ.

Образованную в 1969 г. Лабораторию теории и проектирования больших систем возглавил Г.С. Поспелов, в то время уже чл.-корр. АН СССР. В отделе проводились работы по автоматическому регулированию, разрабатывалось программно-целевое планирование и управление сложными производственно-экономическими комплексами, велись исследования в области искусственного интеллекта. Работы Г.С. Поспелова по автоматизации захода на посадку самолета в сложных метеоусловиях стали теоретическим фундаментом, на базе которого были начаты опытные разработки, а затем и серийный выпуск аппаратуры для автоматизации посадки. В 1972 г. за исследования по динамике релейных систем Г.С. Поспелову была присуждена Госпремия СССР.

Под научным руководством Г.С. Поспелова и его преемника В.М. Солодова были реализованы диалоговые системы перспективного планирования развития отраслей промышленности: система МОНОЛИТ (разработка ВЦ РАН и институтов Миноборонпрома), система ГРАНИТ (ВЦ РАН и Минрадиопром), ДИСФОРП (ВЦ РАН и Минмаш).

Основные исследования по искусственному интеллекту велись в секторе, который много лет возглавлял доктор технических наук, профессор Д.А. Поспелов. Впоследствии на базе этого сектора был создан Отдел интеллектуальных прикладных систем, возглавляемый В.Ф. Хорошевским.

В секторе моделирования водных систем, созданном нашим ветераном П.П. Корявовым и ныне возглавляемом Б.В. Архиповым, проводились расчеты влияния морской среды на различных объекты, такие как терминалы по отгрузке нефтепродуктов, портовые сооружения, энергетические станции, буровые платформы, подводные трубопроводы, их строительство, эксплуатация, обеспечение эффективного и безопасного функционирования. По договорам с заказчиками решались задачи, связанные с проектированием объектов нефтегазовой промышленности на северо-востоке о. Сахалин, в Карском, Балтийском, Каспийском и других морях.

Отделом механики сплошных сред на протяжении 40 лет руководил Ю.Д. Шмыглевский. Мировую известность получили работы 50-х–60-х гг. прошлого века по вариационным задачам газовой динамики и задачам внешнего обтекания. В 70-е–80-е годы был решен ряд задач о трехмерных оптимальных соплах и о течениях в турбинах и каналах, появились новые направления: прямые и обратные задачи динамики излучающего газа, теория взрыва, газовая и твердотельная плазма, пневмомеханические системы и системы трубопроводов. Среди многих результатов отметим следующие: изучен принципиально новый реактивный лазерный двигатель, создана модель Тунгусского явления, позволившая определить ряд его ключевых параметров, рассчитывались теплозащитные покрытия космических аппаратов, взаимодействие потока космической пыли с атмосферами планет, проводились обширные численные эксперименты по исследованию ударных волн. К моделированию глобального климата Земли добавились экологические процессы. В последние 15 лет моделировались режимы работы газопровода через Черное море.

Основным направлением работ отдела вычислительных методов была разработка и исследование новых методов решения задач вычислительной математики. Под руководством А.А. Абрамова была построена теория устойчивого переноса граничных условий для сингулярных и нелинейных дифференциальных уравнений; на ее основе созданы высокоэффективные аналитико-численные методы решения краевых и спектральных задач. С их помощью было решено большое количество задач радиофизики, акустики, физики твердого тела, квантовой механики, ядерной физики и др.

Были разработаны численные методы для нелинейных эволюционных уравнений с частными производными, задач фильтрации многокомпонентных смесей, задачи самофокусировки лазерного луча в нелинейной среде и моделированию гидрофизических процессов в реальных водоемах. Под руководством профессора Б.В. Пальцева созданы принципиально новые методы решения краевых задач для линеаризованных и нелинейной систем Навье–Стокса для несжимаемой жидкости. Значительные достижения получены в отделе по разработке теории и численных методов решения сложных задач механики деформируемого твердого тела: для многослойных сред, для деформируемых материалов под действием интенсивных термомеханических нагрузок при конечных и больших упругопластических деформациях, с учетом трения, а также разрушения. Эти методы нашли применение в целом ряде отраслевых НИИ, в машиностроении при решении проблем обработки металлов давлением и пр. Г.И. Пшеничным создана новая теория сетчатых оболочек, нашедшая широкое применение при проектировании многих ответственных строительных сооружений, при разработке систем автоматизированного проектирования самолетов.

В секторе аналитико-численных методов математической физики (заведующий — д.ф.-м.н. В.И. Власов) создан ряд принципиально новых высокоэффективных методов решения краевых и спектральных задач, в том числе для нелинейных сингулярно возмущенных уравнений и систем, в сложных областях. Одним из них является метод мультиполей, предназначенный, в частности, для эллиптических задач (возможно, с разрывными коэффициентами) в пространственных

областях с конусами и многогранными углами. Метод обладает экспоненциальной скоростью сходимости и обеспечивает высокую точность для решения и его производных вплоть до вершин конусов и ребер многогранных углов, а также для коэффициентов интенсивности, показателей сингулярностей, емкости. Другие варианты метода мультиполей предназначены для решения спектральных задач (например, для операторов типа Бельтрами–Лапласа в областях на сфере), а также для плоских эллиптических краевых задач в сложных, возможно, многосвязных и многолистных областях с границей, содержащей сложные структурные элементы. Метод мультиполей позволяет находить асимптотики решения и его характеристик при сингулярном деформировании области. Этот метод был теоретически обоснован и применен к ряду важных прикладных проблем, в том числе к расчету полей в высоконагруженных элементах аэрокосмических конструкций, современных лазерах, ионных проекторах и химико-технологических установках. Разработан также высокоэффективный аналитико-численный метод решения нелинейных сингулярно возмущенных систем дифференциальных уравнений, примененный к расчету взаимодействия полей в полупроводниковых микроэлектронных приборах. Построена принципиально новая теория вариации конформного отображения при сингулярном деформировании области. Эта теория нашла приложение к эллиптическим краевым задачам в сингулярно возмущенных областях, к задачам гидродинамики со свободной границей, к проблеме магнитного пересоединения в физике плазмы, к задаче обращения для уравнений класса Фукса, к решению проблемы “кроудинга” для интеграла Кристоффеля–Шварца. Получил развитие метод Леви–Гарабедяна для решения задачи Коши для эллиптических уравнений с приложением к расчету и оптимизации электронно-вакуумных приборов с мощными релятивистскими электронными пучками (электронных пушек). Дано обобщение метода Треффца–Куфарева для расчета напряженного состояния стержней со сложными профилями. Разработаны и численно реализованы математические модели ряда сложных физико-механических явлений: эффекта магнитного пересоединения в космической и лабораторной плазме; кавитационного обтекания препятствий; полета и разрушения космических тел при движении в атмосфере планет в применении к эффекту соударения кометы Шумейкера–Леви с Юпитером и к феномену Тунгусского метеорита.

В 1980 г. был создан отдел прикладных проблем оптимизации. Его руководителями были Ю.Г. Евтушенко, затем В.П. Мазурик, а в настоящее время В.Г. Жадан. В отделе были проведены глубокие теоретические исследования по линейному, нелинейному, равновесному программированию, глобальной и многокритериальной оптимизации, оптимальному управлению. Были разработаны новые численные методы решения задач указанных классов. Большую популярность приобрели созданные в отделе системы ДИСО, ЛЕКСИКОН, МАСТЕР, ЛП-БЭСМ 6, ЛП-ЕС, ЛП-ПК. Эти системы и отдельные их фрагменты широко используются в нашей стране для решения самых разнообразных оптимизационных задач.

Значительная теоретическая и внедренческая работа была проведена в отделе методов проектирования развивающихся систем, руководимом В.Р. Хачатуровым. Были, в частности, разработаны система проектирования на ЭВМ генеральных схем обустройства нефтяных и газовых месторождений, система проектирования морских месторождений нефти и газа, системы перспективного планирования добычи нефти и газа для отдельного месторождения и группы месторождений региона и ряд других. Они использовались при проектировании освоения многочисленных месторождений в нашей стране и за рубежом. Укажем только некоторые из них: Самотлорское, Холмогорское (Западная Сибирь), Усинское (Коми АССР), Медведовское (Куйбышевская обл.), Каражанбас (Казахстан), морские месторождения острова Сахалин и Республики Вьетнам. Экономический эффект от внедрения этих систем достигал 20 % от объема капитальных вложений, требуемых при традиционном проектировании.

В процессе выполнения этих проектов были разработаны многочисленные математические модели, сформулированы разнообразные задачи дискретной многокритериальной оптимизации, возникающие при проектировании комплексного освоения регионов, созданы программы, реализующие новые методы их решения. По этой теме были опубликованы сотни статей и брошюр. Итоги многолетней, самоотверженной работы были подведены в книгах “Комбинаторные методы и алгоритмы решения задач дискретной оптимизации большой размерности” и “Математические методы регионального программирования”. По материалам работ были защищены десятки

кандидатских и 4 докторских диссертации. В 2003 г. разработчики систем планирования добычи газа и нефти — сотрудники отдела В.Р. Хачатуров, А.Н. Соломатин и В.Н. Бобылев — были удостоены Премии и медали им. А.Н. Косыгина Российского союза товаропроизводителей “за большие достижения в решении проблем развития экономики России”.

В 1990 г. был образован Отдел сложных систем. В отделе были разработаны методы решения блочных целочисленных задач математического программирования (В.И. Цурков, И.Л. Авербах), методы итеративного агрегирования задач оптимального управления системами с сосредоточенными и распределенными параметрами (В.И. Цурков, И.С. Литвинчев). Построены модели согласованного роста в системе динамического межотраслевого баланса с мощностями, которые описываются нелинейными производственными функциями, разработана система обработки текстов на русском языке ОРФО и система КОНТЕКСТ — интеллектуальный англо-русско-английский компьютерный словарь (А.А. Соколов, А.М. Башлыков, И.С. Ашманов, О.Г. Григорьев, А.В. Байтин, Л.Е. Березкина). Разработаны принципы построения систем автоматического распознавания, использующих стереоскопическое зрение (С.А. Ашманов, А.Б. Мурынин, И.А. Матвеев, В.Д. Кузнецов).

Отдел методов нелинейного анализа был переведен в ВЦ РАН из Института проблем кибернетики в 1997 г. Вначале его возглавлял Е.А. Гребенников, а в настоящее время А.З. Ишмухаметов. В отделе разрабатывается конструктивная теория гамильтоновых систем на основе широкого применения символьных вычислений. В работах профессора В.Г. Карманова и его учеников исследован широкий круг вопросов, связанных с математическим программированием, и рассмотрены вырожденные задачи линейного программирования. Разработаны новые эффективные численные методы решения задач оптимизации. В работах ведущего научного сотрудника В.А. Березнева предложена новая модификация широко используемого симплекс-метода, обладающая полиномиальной сложностью.

В группе, возглавляемой профессором А.З. Ишмухаметовым, разрабатываются численные методы решения задач оптимального управления с сосредоточенными и распределенными параметрами. В частности, получено систематическое описание классов задач оптимального управления и условий на возмущения, при которых решения возмущенных и невозмущенных задач близки.

Отдел надежности и устойчивости систем создан в ВЦ РАН в 1997 г. Под руководством профессора Н.А. Северцева в отделе разрабатывается математическая теория надежности, эффективности, безопасности и устойчивости сложных систем на всех стадиях жизненного цикла технических изделий (атомные реакторы, ракеты и т. д.). Созданы алгоритмы прогнозирования показателей надежности технических объектов, изготовленных малыми сериями. Результаты работы отдела опубликованы в многочисленных статьях и 14 монографиях, напечатанных в издательствах “Наука”, “Высшая школа”, ВЦ РАН и др., из них 5 рекомендованы Министерством Образования в качестве учебных пособий для Вузов.

Отдел систем математического обеспечения был одним из первых отделов ВЦ РАН. Основной задачей отдела сначала был расчет траекторий первых советских спутников. Работы велись в закрытом режиме, в них принимали участие недавние выпускники мехмата МГУ В.М. Курочкин, А.И. Срагович, А.Я. Фалетова, Н.Н. Стрелкова. Эти расчеты продолжались вплоть до 1962 г., за что В.М. Курочкин и А.И. Срагович были награждены орденами.

С конца 50-х гг. в отделе развернулись работы по автоматизации программирования. Тогда это называлось “программирующие программы” (ПП). Одна из первых ПП была разработана А.П. Ершовым, Л.Н. Королевым, В.М. Курочкиным, Л.Д. Паниной и В.Д. Поддерюгиным в 1958 г. Для появившейся в 1964 г. ЭВМ БЭСМ-6 под руководством В.М. Курочкина в 1970 г. был создан транслятор с полного Алгола-60, получивший весьма широкое распространение.

В отделе осуществлена реализация широкого спектра языков программирования: Паскаль (С.И. Пирин), APL (С.П. Прохоров), АБВ (С.С. Лавров, М.И. Селюн, Е.Н. Капустина), Снобол-А (С.С. Лавров, Л.И. Гончарова), Лисп (С.С. Лавров, Г.С. Силагадзе, В.М. Юфа), Модула-2 (В.А. Серебряков, А.Н. Бездушный, В.Г. Лютый), Геомал (И.Е. Педанов, К.П. Голиков). Велись также работы в области разработки систем построения трансляторов (В.М. Курочкин, В.М. Серебряков, А.Н. Бездушный).

Одним из направлений разработки программного обеспечения БЭСМ-6 стало создание диалоговых систем программирования. Первыми работами в этом направлении были система “Пульт” (В.М. Брябрин, В.М. Сафонов) и “Диалог” (В.И. Филиппов). Под руководством С.А. Абрамова успешно ведутся работы в области компьютерной алгебры.

В последние годы важным направлением деятельности отдела стало создание распределенных информационных систем, в частности цифровых (электронных) библиотек (В.А. Серебряков, А.Н. Бездушный, А.А. Муромский, Н.П. Тучкова).

В течение прошедшего полувека коллектив института провел огромную научно-исследовательскую работу, в стенах института или впоследствии за его пределами стали академиками РАН следующие сотрудники: А.П. Ершов, Ю.И. Журавлев, П.С. Краснощек, А.А. Петров, Г.С. Поспелов, Г.И. Савин, Ф.Л. Черноусько, членами-корреспондентами РАН — Ю.Г. Евтушенко, А.А. Марков, Ю.Н. Павловский, К.В. Рудаков, С.С. Лавров, Ю.А. Флеров.

Говоря о замечательных ученых, в свое время работавших в нашем Вычислительном Центре и оставивших в нем о себе яркий и незабываемый след, мы должны упомянуть А.А. Маркова. Им создано особое, “конструктивное” направление в математике, опубликованы работы по механике и едва ли не по всем теоретическим разделам математики. К его 100-летию выпущены два тома “Избранных трудов”.

В нашем институте в качестве младшего научного сотрудника работал А.П. Ершов, впоследствии избранный академиком РАН. Много лет в ВЦ АН проработал член-корреспондент РАН С.С. Лавров, видный специалист по программированию и небесной механике. В настоящее время в институте по совместительству работают академики О.М. Белоцерковский, В.А. Ильин, Е.И. Моисеев, Г.И. Савин, оказывая неоценимую помощь в нашей работе.

С самого начала организации института предусматривалось ведение в нем работ по теории и применению старейшей прикладной науки — номографии. В этом направлении институт имеет большие заслуги благодаря известному специалисту Г.С. Хованскому, проработавшему в институте со дня основания до своей кончины. Сотрудниками института были изданы популярные справочники, монографии по специальным функциям, операционному исчислению, математическим таблицам. Это направление возглавлял В.А. Диткин, который со дня основания института и до 1981 г. был заместителем директора по науке.

Благодаря работе энтузиастов — В.А. Диткина, К.А. Карпова и М.К. Керимова — работа по выполнению и изданию таблиц была поставлена на мировом уровне. Было создано большое и уникальное собрание математических таблиц, многие из которых до сих пор не потеряли своего значения. Всего в институте издано 57 больших оригинальных томов таблиц, переведены на русский язык и переизданы некоторые иностранные таблицы.

Многие годы институт является кузницей кадров высококвалифицированных специалистов по всем прикладным направлениям, многие питомцы института создали свои школы не только в бывших республиках СССР, но и за рубежом. С 1955 г. аспирантуру ВЦ АН окончили около тысячи аспирантов. Только за последние 20 лет на заседаниях ученых советов института защищено около 50 кандидатских и около 20 докторских диссертаций. Значительная часть их авторов стали сотрудниками ВЦ РАН. К сожалению, число аспирантов и докторантов в последние годы резко сократилось. Снизилось также число защищенных диссертаций. Это объясняется известными причинами в нашей стране. Ряд ученых института выехал за границу, однако многие из них сохранили связь с институтом.

В настоящее время в ВЦ РАН действуют четыре специализированных ученых совета по защите кандидатских и докторских диссертаций. Особо следует отметить роль института в создании и работе известного во всем мире Физико-технического института (физтех), ныне университета. Все эти годы ВЦ РАН являлся базовым институтом для физтеха, обеспечивал его преподавательскими кадрами. В стенах ВЦ РАН проходят занятия и дипломная практика студентов трех крупных кафедр физтеха. Связь ВЦ РАН и физтеха всегда была взаимной: многие ученые ВЦ РАН были деканами, заведующими кафедрами, профессорами физтеха. Питомец ВЦ РАН академик О.М. Белоцерковский много лет работал ректором физтеха. А.А. Дородницын возглавлял кафедры физтеха едва ли не со дня основания института и до своей кончины. В свою очередь, многие видные ученые ВЦ РАН являются выпускниками физтеха.

Сотрудниками ВЦ АН за прошедшие годы опубликованы многие сотни научных статей, монографий, учебников и справочников, некоторые из которых переведены на иностранные языки. Отдельные труды были удостоены высоких государственных премий.

А.А. Дородницын создал и возглавил ведущий научный “Журнал вычислительной математики и математической физики” (в настоящее время главный редактор — академик Ю.С. Осипов). Наш сотрудник академик В.В. Румянцев является главным редактором авторитетного журнала “Прикладная математика и механика”. Учеными ВЦ РАН организованы три международных научных журнала: “Распознавание образов и обработка изображений” (создатель и главный редактор Ю.И. Журавлев) и два журнала, издаваемых на английском языке в Великобритании “Оптимизация и софтвер” (создатель и главный редактор Ю.Г. Евтушенко), “Интегральные преобразования и специальные функции” (создатель А.П. Прудников, в настоящее время главный редактор — Е.И. Моисеев).

ВЦ РАН с первого дня своего существования организовал довольно мощную издательскую базу. В первые годы на этой базе было издано большое число математических таблиц, сборников научных работ, монографий, препринтов, авторефератов. В настоящее время издательская деятельность успешно продолжается под руководством С.И. Гусева. Регулярно издаются труды сотрудников института.

Упомянем также еще одну весьма популярную разработку — компьютерную игру “Тетрис”, созданную бывшим сотрудником ВЦ РАН инженером А.Л. Пажитновым. Эта игра получила мировое признание. На протяжении многих лет она имела большой коммерческий успех. Часть денег, полученных от ее продажи, до сих пор используется для закупки электронной техники, проведения научных конкурсов и премирования сотрудников.

В те же годы по инициативе А.А. Дородницына инженеры начали работы по теме “Распознавание речи”. Главный исполнитель В.Н. Трунин-Донской вместе со своими сотрудниками достиг значительных результатов. Эти работы в свое время входили в список особо важных работ Президиума АН СССР и контролировались правительственными органами. Был разработан эскизный проект специализированной бортовой ЭВМ с работающим макетом.

За все эти годы руководство ВЦ РАН было стабильным. С 1955 г. по 1989 г. директором являлся академик А.А. Дородницын, а с 1989 г. по настоящее время — член-корреспондент РАН Ю.Г. Евтушенко. В прошлом пост заместителя директора занимали В.А. Диткин, Н.Н. Моисеев, П.С. Краснощеков, а в настоящее время — Ю.А. Флеров, Ю.И. Журавлев, Г.М. Михайлов; учеными секретарями института работали Я.И. Алихашкин, А.Г. Шмидт, П.П. Корявов, В.Л. Вен. В последние годы ученым секретарем института является доктор физико-математических наук Л.В. Шуршалов.

В этом кратком очерке невозможно было уделить должное внимание многим работам, выполнявшимся в институте, упомянуть всех достойных сотрудников, внесших свой вклад в науку, указать на их роль в успехах ВЦ РАН. Этот недостаток с лихвой покрывается последующими статьями о работе практически всех отделов нашего института. Несмотря на многие трудности, ВЦ РАН продолжает успешно работать и вносить весомый вклад в науку нашей страны.

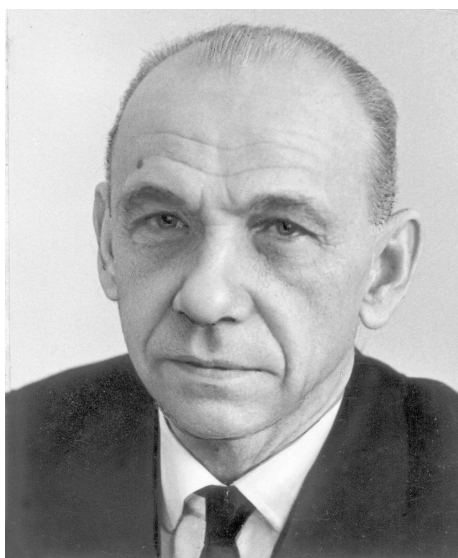
# 50 ЛЕТ ИСТОРИИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ: ОТ “СТРЕЛЫ” ДО КЛАСТЕРНЫХ РЕШЕНИЙ

*Ю.Г. Евтушенко, Г.М. Михайлов, М.А. Копытов, Ю.П. Рогов*

---

## 1. Как это начиналось?

Постановление Совета министров СССР от 3 августа 1954 г. о создании Вычислительного центра Академии наук СССР (ВЦ АН СССР) положило начало истории нашего института [1].



*А.А. Дородницын*

Постановлением Президиума АН СССР от 14 января 1955 г. вновь созданному институту под руководством академика А.А. Дородницына были выделены две самые современные отечественные ЭВМ: БЭСМ АН СССР, разработанная коллективом сотрудников Института точной механики и вычислительной техники (ИТМ и ВТ) под руководством С.А. Лебедева [2], и ЭВМ “Стрела”, созданная в специализированном конструкторском бюро СКБ-245 под руководством Ю.Я. Базилевского. Беспрецедентное событие по тем временам, когда дорогостоящая и стратегически важная техника устанавливается в новом институте Академии наук СССР, возглавляемом А.А. Дородницыным, самым молодым членом Академии. Необходимо заметить, что БЭСМ так и осталась на площадке ИТМ и ВТ (позднее в ВЦ АН СССР будет установлена БЭСМ-2), а тогда во вновь выстроенном здании ВЦ АН СССР была установлена ЭВМ “Стрела-3”. Заметим, что в 1955 г. истории электронной вычислительной

техники (ВТ) не было практически и десяти лет отроду (ЭНИАК США – 1946 г., а в СССР МЭСМ – 1951 г.).

Для этого раннего периода становления и развития вычислительной техники характерным является появление различных коллективов и школ, ведущих научно-исследовательские работы по разработке ЭВМ и программного обеспечения (ПО), имеющих разную архитектуру, разные объемы оперативной памяти, а следовательно, и разные форматы команд и адресного пространства, быстродействие и надежность. Специалистов по вычислительной технике было недостаточно. Московский энергетический институт (МЭИ) был одним из первых, где начали готовить инженеров этого профиля на кафедре математических вычислительных машин под руководством проф. Г.М. Жданова. Первые выпускники этой кафедры становятся учениками выдающегося ученого, академика С.А. Лебедева. И впоследствии в ИТМ и ВТ они будут возглавлять целые направления отечественной вычислительной техники. Отметим среди них замечательных ученых академиков В.А. Мельникова и В.С. Бурцева, а также А.А. Соколова, М.В. Тяпкина, В.Н. Лаута, В.П. Смирягина. Затем идет новое поколение выпускников МЭИ, в числе которых В.И. Смирнов, Л.Ф. Чайковский, Ю.И. Торгов, Л.А. Зак, Ю.И. Митропольский и др. [2].

Коллектив инженеров и техников, которому было доверено столь грандиозное по своим масштабам и очень дорогое оборудование, представлял из себя поколение специалистов,





ЭВМ “Стрела-3” (1959 г.)  
(фото Дм. Бальтерманца)

которым историей было предназначено стать первопроходцами совершенно нового направления в истории развития науки и техники. В это трудно поверить, но одна из замечательных страниц истории отечественной вычислительной техники и вычислительной математики писалась именно в стенах ВЦ АН СССР в 50-х гг. прошлого века. Эти молодые инженеры, первые среди первых, достойны того, чтобы их перечислить поименно: В.П. Смирягин, Л.Ф. Чайковский, Ю.И. Торгов, Ю.Н. Сосенков, В. Командровский, Т. Мильченко (все — выпускники МЭИ), Г. Кочетков, С. Девятов, В. Юдашина, В. Ващенко, Н. Ломакин, И. Петров, Б. Марьясин, Л. Чиненова, Е. Комарова, В. Каплунова, Л. Серебряникова и многие другие.

В области программирования ведущая роль была отведена отделу В.М. Курочкина, куда входили первоклассные программисты на машинных кодах А.И. Срагович, Н.Н. Стрелкова, А. Фалетова, Г. Седанкина и др.

В 1958 г. начинается серийное производство БЭСМ с оперативной памятью на ферритовых сердечниках (МОЗУ). В варианте с этой памятью машина получает название БЭСМ-2 [2]. Она на тот период была одной из самых быстродействующих ЭВМ в Европе (12 тысяч операций в секунду). Первый образец БЭСМ-2 во II квартале 1959 г. устанавливается в ВЦ АН СССР. Руководителем коллектива назначен блестящий специалист, выпускник кафедры математических вычислительных машин МЭИ Л. Зак. В этом коллективе начали свою профессиональную деятельность замечательные инженеры, молодые специалисты В. Трунин-Донской,

В.В. Чибисов, Т.М. Лопатникова, В.Ф. Ващенко, З.А. Вадова, Н. Кулешов, Б. Щербаков и многие другие.

Очевидно, уже в этот период А.А. Дородницын приходит к пониманию роли ВЦ АН СССР и определению основных функций этой организации в бурно развивающемся мире отечественной вычислительной техники. По замыслу А.А. Дородницына ВЦ АН СССР, где устанавливаются самые мощные ЭВМ отечественного производства, должен стать не только местом, где предоставляются вычислительные ресурсы для пользователей институтов АН СССР, не только институтом в области разработки численных методов решения задач математической физики на ЭВМ, средств автоматизации программирования. ВЦ АН СССР должен стать площадкой для апробации и доводки до серийного образца разрабатываемых в ИТМ и ВТ ЭВМ, а также полигоном всесоюзного значения для подготовки научных и инженерных кадров. История показала правильность идей А.А. Дородницына в определении задач Вычислительного центра. Высокий уровень специалистов ВЦ позволял им плодотворно сотрудничать с разработчиками ВТ, добиваться совместных успехов в разработках, модификации и совершенствовании ВТ, а позднее системного программного обеспечения и языков программирования.

Институт превратился в огромный научно-учебный центр, где шла подготовка кадров и стажировка специалистов из самых различных организаций всего Советского Союза — от Прибалтики до республик Средней Азии, Закавказья и Сибири.

Что же касается ЭВМ “Стрела”, то в ВЦ эта ЭВМ была ориентирована на решение крупных задач специального назначения и находилась в особом режиме использования. Безусловно, А.А. Дородницын понимал, что линия “Стрелы” в СССР не будет продолжена. “Стрела” была чрезвычайно дорогостоящей и уже по основным параметрам начинала проигрывать БЭСМ-2.

В 1954 г. в ИТМ и ВТ П.П. Головистиковым был разработан новый элемент для ЭВМ — динамический триггер с запоминающей емкостью (ДТ) [2]. Одновременно с этим в 1955 г. на новой элементной базе начинается разработка ЭВМ М-20, которая по своим основным параметрам должна была на порядок превосходить ЭВМ “Стрела”.

Пока линия БЭСМ еще не набрала полные обороты, А.А. Дородницын дает возможность своим сотрудникам в ВЦ, занятым эксплуатацией, реализоваться в деле модификации “Стрелы”. Начинается работа по созданию ЭВМ “Стрела-М”, которая должна иметь производительность 20 тысяч операций в секунду и ОЗУ на магнитных сердечниках с объемом 4096 слов. Арифметическое устройство (АУ) создается на динамических триггерах разработки ИТМ и ВТ (Ю.И. Торгов), устройство управления (УУ) — на динамических элементах разработки ВЦ АН СССР (Л.Ф. Чайковский и Г.М. Михайлов), МОЗУ — на новом принципе адресной дешифрации разработки ИТМ и ВТ (Т.М. Лопатникова и В.Ф. Ващенко). С 1961 г. ЭВМ “Стрела-М”, изготовленная на конструктивных элементах Ульяновского завода им. Володарского в единственном экземпляре, вступает в опытную эксплуатацию и затем проработает в ВЦ еще в течение семи лет.

Разработкой “Стрелы-М” мы перешагнули двадцатитысячный рубеж производительности практически одновременно с первыми экземплярами М-20. При этом модифицированная “Стрела-М” отличалась от М-20 очень высокой степенью надежности. Практически одновременно в СКБ ИТМ и ВТ появляется первая транзисторная ЭВМ БЭСМ-3М, затем БЭСМ-4 [2], которые повторяют систему команд М-20 с некоторым расширением. ВЦ АН СССР становится основной площадкой, где будут установлены обе модификации (руководители работ Ю.Н. Сосенков и В.А. Большаков, Г. Заварза), на базе которых создается практически новый научно-учебный центр подготовки кадров для Академии наук СССР и других научных центров.

В 1965 г. академик А.А. Дородницын дает поручение своим инженерным службам подготовить площадку для новой ЭВМ. Вскоре в стенах ВЦ появляется первая БЭСМ-6 (опытный образец), которой судьбой было предначертано стать легендарным детищем академика С.А. Лебедева. По существу, это уже новая веха в отечественной и мировой истории ВТ, поскольку создается ЭВМ, достигшая по производительности миллиона операций в секунду. БЭСМ-6 — это качественно новая вычислительная система (ВС), где роль системного программного обеспечения рассматривается по важности наравне с основными аппаратными средствами. На базе характерных особенностей архитектуры БЭСМ-6: развитой системы прерываний, страничной организации оперативной памяти, кэширования, расслоения оперативной

памяти по блокам, наличия привилегированных команд и режимов работы ЭВМ, — практически впервые для массовой отечественной серийной машины создается операционная система (ОС), реализующая мультипрограммирование, организацию виртуальной памяти, систему управления задачами пользователей в различных режимах и многие другие характерные для ОС функции.

Первая ОС для БЭСМ-6 — это ОС Д-68, созданная коллективом ИТМ и ВТ под руководством Л.Н. Королева в составе А.Н. Томилина, В.П. Иванникова, М.Г. Чайковского и других, стала официально поставляться пользователям БЭСМ-6 [2].

Особая роль в этом авторском коллективе принадлежала А.Н. Томилину, который фактически возглавлял работу по отладке ОС. Отладка ОС проходила в основном на опытном



*ЭВМ БЭСМ-6. ВЦ АН СССР (1989 г.)*

экземпляре БЭСМ-6 в ВЦ АН СССР. Осенью 1968 г. (отсюда и название ОС — Д-68 — диспетчер 1968 г.) Межведомственная комиссия под председательством А.А. Дородницына официально приняла системное программное обеспечение (СПО), включающее ОС Д-68 и набор систем программирования:

- компиляторы с языков высокого уровня с соответствующими библиотеками на входных языках: АЛГОЛ-60 разработки ВЦ АН СССР под руководством В.М. Курочкина, ФОРТРАН-Дубна под руководством Н.Н. Говоруна [3],

- ассемблеры АВТОКОД ИТМ и ВТ М.Г. Чайковского и БЕМШ В.С. Штаркмана ИПМ, АВТОКОД СОМИ.

Уже первый год эксплуатации БЭСМ-6 с ОС Д-68 показал, что аппаратные средства позволяют значительно расширить функции ОС. В частности, реализовать пакетную обработку в полном объеме с буферизацией вводимой информации, а также добавить ряд дополнительных функций ОС с использованием экстракодов, чтобы иметь возможность строить разнообразные сложные системы обработки информации на пользовательском уровне.

В это время начинаются новые разработки ОС для БЭСМ-6. Одни авторские коллективы идут, отталкиваясь от Д-68 и используя соответствующий ассемблер при реализации: ОС ДИСПАК (В.Ф. Тюрин), ОС ДУБНА (Н.Н. Говорун, И. Силин, В. Шириков). Другие разрабатывают новые концепции построения ОС: ОС ИПМ (М.Р. Шура-Бура, Э.З. Любимский, В.А. Крюков), ОС НД-70 (В.П. Иванников).

Все работы по ОС были успешно завершены, и каждая ОС имела свою историю эксплуатации. Наиболее распространенными оказались ОС ДИСПАК и ОС ДУБНА [3].

Работы по системному программному обеспечению БЭСМ-6 показали, что в стране имеются не только выдающиеся специалисты по разработке аппаратных средств, но также талантливые специалисты по созданию системного программного обеспечения.

У нас в стране успех БЭСМ-6 был огромен. Началось обсуждение проекта новой вычислительной системы БЭСМ-10 (ИТМ и ВТ). Отечественная вычислительная техника находится на подъеме. Но уже заметно отставание в области высоких технологий. Специалисты отчетливо понимали, что дальнейший прогресс ВТ связан с развитием элементной базы в направлении



*Коллектив инженеров ВК БЭСМ-6. 1978 г. Фото А.В. Гениевского.*

*Слева направо: В.М. Юдашина, Т. Карпова-Сингх, Т. Лопатникова, В. Лавыгин, Л. Ломакина, Э. Горбатов, В. Ващенко, Л. Смирнова, Г. Михайлов*

миниатюризации и интеграции, поиском новых технологий и технических решений. Многие считали, что элементная база ЭВМ будет активно развиваться под существенным влиянием запросов отечественных специалистов по архитектуре ВС с учетом внимательного изучения зарубежного опыта. Но, увы! . .

Так виделось развитие вычислительной техники “на поверхности” глазами специалистов в 70-е гг. Однако решения по дальнейшему развитию отечественной вычислительной техники, принятые “сверху”, были иными. Тем временем в мире науки и вычислительной техники происходят события, все более приближающие нас к революции в микроэлектронике, где в скором будущем начнет работать известный теперь каждому специалисту ИТ “закон Мура”.

В этот период ГДР принимает решение ориентировать свою промышленность по производству средств вычислительной техники на серию IBM-360. Так появляется проект по разработке ЭВМ R-40 (ЕС-1040) на заводе ROBOTRON (Дрезден), который реализуется специалистами ГДР без интеграции с фирмой IBM. Этот фактор в дальнейшем сыграл огромную роль в определении стратегии развития вычислительной техники во всем социалистическом лагере.

В конце 1966 г. на заседании ГКНТ и Академии наук СССР при поддержке министра МРП СССР В.Д. Калмыкова, Президента АН СССР М.В. Келдыша принимается историческое решение о копировании серии IBM-360. Против этого решения решительно выступили А.А. Дородницын, С.А. Лебедев и М.К. Сулим. Однако они остались в меньшинстве. Итак, решение о разработке семейства ЕС ЭВМ состоялось. Под эту грандиозную программу были переориентированы многие НИИ и заводы, многим специалистам пришлось переучиваться и переквалифицироваться, в студенческие программы вузов стали в основном включать вопросы структуры, архитектуры и ПО ЕС ЭВМ. Была создана новая технологическая база для производства интегральных схем (ИС), полупроводниковой электроники и других средств ВТ. Как и предсказывалось, другие направления развития отечественной вычислительной техники постепенно стали сокращаться из-за недостатка средств, заказчиков, молодых кадров и других объективных и субъективных причин.

Будучи не только блестящим ученым, но и мудрым государственным человеком, А.А. Дородницын решил, что время споров прошло, решение о производстве ЕС ЭВМ принято, и он становится руководителем всех Межведомственных комиссий по приемке ЭВМ ЕС. Он понимает, что только высокое качество и надежность серии ЕС может как-то способствовать общему успеху. Что же касается ВЦ АН СССР, то он не сразу дал “добро” на установку ЕС ЭВМ, поскольку первые модели ЕС не отличались высокой надежностью и уступали по производительности БЭСМ-6.

А.А. Дородницын активно поддерживает усилия своих специалистов, направленные на создание мощной многомашинной распределенной системы коллективного пользования на базе БЭСМ-6, которая развивается в плане увеличения мощности аппаратных средств (оперативная память, диски, дисплеи, новые вводные устройства). Под эти расширения аппаратуры модифицируются и ОС.

Вскоре, поняв все преимущества новой ОС ДИСПАК, мы не только установили эту ОС на своих БЭСМ-6, но и в соответствии уже со своими традициями сделали ВЦ АН СССР полигоном этой операционной системы. Автор ОС ДИСПАК В.Ф. Тюрин более 10 лет со своим коллективом модифицировал ОС, развивал ее и создавал новые версии. В ВЦ непосредственную работу по поддержке ОС ДИСПАК в тесном контакте с В.Ф. Тюриным осуществляли М.А. Копытов и Ю.П. Рогов. ВЦ АН СССР стал центром, где все предприятия-пользователи ОС ДИСПАК могли получить очередную версию.

К 1979 г. с помощью ОС ДИСПАК три БЭСМ-6 были объединены в систему с общей памятью на дисках ЕС ЭВМ. На этом комплексе создается мощная система коллективного пользования для собственных пользователей (примерно 400 человек), пользователей из 20 вузов и 52 институтов АН СССР (примерно 1000 человек), пользователей из 40 других организаций, с которыми ВЦ вел общие работы (примерно 100 человек). Наряду с пакетным режимом обработки активно внедряется диалоговый режим. В ВЦ АН СССР используются диалоговые системы собственной разработки ПУЛЬТ и СЕРВИС (В.М. Брябрин, В.И. Сафонов, С.В. Сорокин). В системе устанавливается многовходовый коммутатор терминалов разработки НИИП (г. Челябинск). Всего в системе было задействовано 63 терминала VIDEOTON-340. В основном терминалы были размещены на площадках ВЦ, но были также десять внешних выделенных телефонных линий, по которым ВЦ был связан с рядом институтов: ИФП, ИТМ и ВТ, ИМЕТ, ФИАН, ИОФАН, ИНЭОС, ИРЭ, ГБС и др. Для обеспечения работы телекоммуникационной среды был выполнен специальный проект, которому предшествовали определенные исследовательские работы (Г.М. Михайлов, Э.К. Горбатов).

В 80-е гг. развертывание кабельной сети, безусловно, было делом новаторским. Этот проект реализовывался исключительно на отечественной кабельной продукции. Впоследствии эта сеть станет основой при создании локальной сети ВЦ РАН и сертификация ее покажет, что она удовлетворяет международному стандарту 3-й категории. Справедливости ради следует заметить, что эта достаточно весомая по масштабам института работа была проведена “с листа”, финансировалась за счет внутренних источников. Проект развертывания первой структурированной кабельной сети (СКС — *такое понятие в международном масштабе появилось только в 90-х гг.*), был реализован в 1986 г. под руководством главного инженера Ю.А. Привезенцева. В основу топологии кабельной сети была положена структура “звезды”, а в качестве среды передачи данных — медный телефонный кабель на витых парах (УТР) с импедансом  $Z = 100 + 15\%$ . Развернутая сеть была функционально интегрированной, то есть включала в себя помимо терминальной сети ЭВМ также сеть телефонии и пожарно-охранной сигнализации. Как уже было сказано, в качестве mainframes использовался многомашинный комплекс ВК БЭСМ-6, а впоследствии был добавлен и двухмашинный комплекс ЕС-1061 – ЕС-1066.

В 1981 г. А.А. Дородницын принимает решение об установке ЭВМ ЕС. Пользователям ВЦ было уже необходимо иметь среду и платформу ЕС. Становление платформы ЕС ЭВМ в стенах ВЦ шло с большими трудностями, вызванными, в первую очередь, ненадежностью ЭВМ ЕС-1060, первой из ЭВМ серии ЕС в ВЦ АН СССР. Для ученых ВЦ и других пользователей, привыкших к тому времени к практически безотказной работе комплекса БЭСМ-6, доступного в любое время суток, ненадежная



*Пульт управления ЕС-1061.  
ВЦ АН СССР, 1987 г.*

- по технологичности и дизайну ЕС-1066 уже не уступала зарубежным моделям;
- ЕС-1066 превосходила БЭСМ-6 по объему оперативной и внешней (диски) памяти;
- по скорости центрального процессора ЕС-1066 превосходила БЭСМ-6 на отдельных задачах, но немного уступала интегральной БЭСМ-6 (ЭЛЬБРУС 1КБ), введенной в эксплуатацию в 1989 г. вместо одной из БЭСМ-6.

В деле становления ЕС ЭВМ в ВЦ АН СССР следует особо отметить огромную роль замечательных специалистов института Ю.Н. Сосенкова, В.А. Большакова, А.Л. Дувакина, В. Лавыгина, Ю.А. Привезенцева, Г.А. Усачева и др.

Кроме поддержки направления развития “больших” ЭВМ (БЭСМ-6, ЕС-1066) А.А. Дородницын организовал группу специалистов для эксплуатации малых ЭВМ.

Группа под руководством В.И. Стеганцева с успехом эксплуатировала в ВЦ в конце 60-х – начале 70-х гг. оригинальные архитектуры МИР-1 и МИР-2 разработки Института кибернетики АН УССР. Когда в стране по примеру ЕС, начал при содействии А.А. Дородницына развиваться новый ряд семейства малых ЭВМ (СМ ЭВМ), то в ВЦ устанавливаются и начинают успешно эксплуатироваться машины этого класса.

## **2. Начало нового этапа: утраченные иллюзии и новые решения**

Первые персональные компьютеры (ПК), как известно, появились в конце 70-х гг. (APPLE — 1976 г.), и в начале 80-х гг. они начинают активно продвигаться на мировых рынках. Мы не будем здесь рассматривать реакцию нашей промышленности на появление этого вида ВТ. Отметим лишь, что методологически она была аналогичной проектам ЕС и СМ. Примерно в 1983 г. в ВЦ создается коллектив под руководством В.М. Брябрина, который начинает активно осваивать эту технику. В ВЦ устанавливаются на условиях совместной научной деятельности несколько ЭВМ IBM PC-XT. Сотрудники из группы В.М. Брябрина, а также некоторые сотрудники из других подразделений (В. Мазурик, Е.Н. Веселов, А. Пажитнов и другие) провели очень важную методологическую работу по освоению специфичной среды и интерфейсов ПК с пользователем. Они обучили программистскую общественность, выпустили соответствующую литературу о ПК, разработали специальное программное обеспечение, включающее, прежде всего, в традиционную среду ПК русскоязычные компоненты. Наиболее известные программные продукты ВЦ — это текстовый редактор “ЛЕКСИКОН” (Е.Н. Веселов), интегрированная система “МАСТЕР” (Е.Н. Веселов) и компьютерная игра “ТЕТРИС” (А. Пажитнов), имевшая огромный международный коммерческий успех.

Когда в начале 90-х гг. происходят политические перемены у нас в стране, становится очевидным, что отечественная вычислительная техника не выдержала конкуренции с Западом.

работа ЭВМ ЕС-1060, вопреки заверениям разработчиков, стала полной неожиданностью. На ней не могли практически решаться задачи наших ученых, которые традиционно требовали большого времени счета и значительных ресурсов памяти. Так как плохо работающий агрегат требует досконального знания его слабых мест, то А.А. Дородницын согласился с нашим предложением временно вывести ЭВМ ЕС-1060 из арсенала основных вычислительных мощностей и превратить эту машину в учебно-полигонный экземпляр, на котором бы проходили подготовку специалисты АН СССР, потенциальные потребители будущих модификаций ЕС ЭВМ. В роли инструкторов-преподавателей выступала бригада разработчиков из НИЦЭВТа.

Следующая ЭВМ ЕС-1066 была уже современной универсальной машиной, которая удовлетворяла требованиям и надежности, и производительности:

- по надежности она была близка к БЭСМ-6;
- программное обеспечение практически соответствовало уровню подобных моделей IBM;

ВЦ начинает терять всех своих пользователей из институтов АН, которые не получая достаточного финансирования, не в состоянии оплачивать предоставляемые ресурсы. Сложившаяся ситуация вынуждает сначала законсервировать в “холодном режиме” все имеющиеся мощности машинного парка ВЦ РАН, а в последующем демонтировать их и списать с баланса ВЦ. Одновременно с этим прекращаются работы по проекту установки в ВЦ РАН супер-ЭВМ на базе высокопроизводительных конвейерных процессоров (ВКП), разрабатываемых в ИТМ и ВТ под руководством А.А. Соколова (ранее планировалось, что по установившейся традиции ВЦ РАН опять станет полигоном для новой ЭВМ ИТМ и ВТ). Начинается новая эра в истории вычислительной техники, которая стала началом конца отечественной индустрии вычислительной техники.

Было решено начать строительство новой вычислительной базы ВЦ РАН с использованием зарубежной вычислительной техники и строить вычислительную систему по принципу открытых систем. Согласно проекту основные вычислительные мощности ВЦ РАН должны были быть компонентами локальной сети ВЦ РАН.

Либерализация внешнеэкономической деятельности предприятий позволила беспрепятственно приобретать практически любые компоненты сети, не требовалось согласовывать каждый шаг выхода во внешний мир с множеством инстанций сверху, а стандарты Internet-сетей к началу 90-х гг. были уже апробированы во многих странах мира.

В качестве коммуникационной среды для развертывания локальной сети мы использовали структурированную кабельную сеть (СКС), ввод в эксплуатацию которой, как было указано выше, завершился в 1987 г.

Рабочая группа по проекту локальной сети ВЦ РАН в составе И.В. Байковой, М.В. Кулагина, М.А. Копытова, Ю.П. Рогова, Ю.А. Привезенцева, В.А. Серебрякова и Г.М. Михайлова (руководитель) принимает решение по развертыванию сети по стандарту 10BASET, принятому комитетом IEEE в 1990 г. На первом этапе развертывания локальной сети ВЦ РАН ее серверная часть была выполнена на рабочих станциях фирмы SUN, во внедрении и освоении которых следует отметить инициативную роль М.В. Кулагина.

Несмотря на известные события, которые происходили в 1990–1993 гг., на развал СССР и приватизационный бум, охвативший страну в тот период, как ни кажется странным, мы продолжали жить и развиваться. Огромную роль сыграло то обстоятельство, что еще в 80-е гг. ВЦ по решению Президиума АН СССР был определен в качестве головного предприятия известного проекта “АКАДЕМСЕТЬ”, в выполнении которого принимали участие многие институты АН СССР (руководитель проекта Э.А. Якубайтис, г. Рига, руководитель от заказчика Г. Михайлов, ВЦ АН СССР). К началу появления в мире Internet мы уже имели не только соответствующую программно-аппаратную базу, реализованную на СМ ЭВМ, но и необходимую коммуникационную среду.

В 1994 г. начинается активное сотрудничество с группой МИ РАН по развертыванию телекоммуникационной среды с выходом на INTERNET, руководимой А.Б. Жижченко. Впоследствии на базе этой группы будет создан Центр научно-технических коммуникаций (ЦНТК РАН), который при поддержке Президента РАН Ю.С. Осипова реализовал крупномасштабный проект по созданию Южной магистральной опорной сети (ЮМОС) совместно с фондом Д. Сороса.

Полномасштабный выход на оптоволоконную сеть нами был реализован в октябре 1995 г. К этому времени на площадках ВЦ РАН была развернута сеть Ethernet на третьем уровне международного стандарта [4, 5], которая начала работать на скорости 10 Мб/с по стандарту 10BASET. В этой масштабной работе приняли активное участие М.А. Копытов, Ю.П. Рогов, И.В. Байкова, М.В. Кулагин, Ю.А. Привезенцев, Г.И. Ковалева, А. Буланже, П. Плечев, А. Метелкин. Руководителем этого проекта был назначен Г.М. Михайлов. Проект был поддержан грантами РФФИ (№ 95-07-20048 и № 96-07-8922), но подавляющая часть финансирования для приобретения коммуникационного оборудования была реализована за счет собственных средств ВЦ РАН.

Рост количества пользователей INTERNET через локальную сеть ВЦ РАН, представленный на рис. 1, отражает в данном случае не только возможности сети, но в первую очередь, оснащение рабочих мест ученых сертифицированными средствами выхода на Internet. Эти

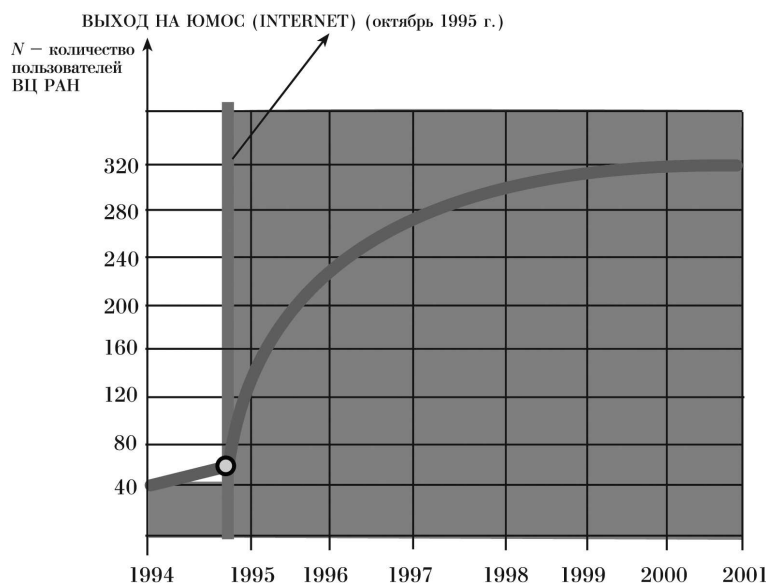


Рис 1. График роста количества пользователей Internet в ВЦ РАН

средства включают в себя наличие выделенных IP-адресов, персональных компьютеров PC или рабочих станций, имеющих необходимые сетевые карты и сертификаты к ним, а также установку каждого рабочего места службой обеспечения работы сети. Эта очень важная и ответственная работа проводилась И.В. Байковой и Ю.П. Роговым. Другая исключительная по важности в стратегическом плане работа, связанная с получением пространства IP-адресов, была выполнена весьма своевременно при активном участии М.В. Кулагина, М.А. Копытова и П. Плечева в 1994–1995 гг.

Итак, мы “в сетях всемирной паутины WWW и транспьютерной мгле”, так поется в одной из известных песен нашего барда Ю. Рогова. Настала новая эра в истории вычислительной техники. Отныне она уже перестает называться отечественной. Такой вот безрадостный финал. . . Тем временем научно-технический прогресс не стоит на месте. Наоборот, он идет семимильными шагами, без перебоев начинает работать закон Мура, когда через каждые 1,5 года идет удвоение производительности микропроцессоров и через каждые два года идет удвоение размера оперативной памяти, а заодно и КЭШей, иногда опережая эти сроки.



Ведущие специалисты И. Байкова и Ю. Рогов. 2001 г.

ВЦ РАН становится одним из первых институтов, где устанавливается первый 64-процессорный транспьютерный кластер GC-64 фирмы PARSYTEC (Германия) [4] — классический образец распределенной вычислительной системы MIMD (Multiple Instruction Multiple Data). Основу программного обеспечения составляет система PARIX (PARallel Unix), которая включает в себя два компилятора голландской фирмы ACE EXPERT: FORTRAN 77 и C ANSI. Ресурсы GC-64 доступны пользователям ВЦ РАН через локальную сеть в режиме удаленного доступа. Вскоре нам становится очевидным, что мы опередили время. Научная общественность

института прежде всего программистское сообщество оказались не вполне готовыми к новому направлению — распараллеливанию задач и созданию параллельных алгоритмов и программ. Одной из первых групп по решению этой задачи в рамках проблемы моделирования циркуляции атмосферы на кластере GC-64 стал коллектив под научным руководством А.В. Шипилина [4]. На примере решения данной задачи мы получили возможность определить наиболее слабые места кластерных решений, построенных на транспьютерах. Таковым слабым звеном, как и ожидалось, оказалась проблема передачи данных между узлами, а также между узлами и управляющим HOST-модулем. История развития транспьютерных систем покажет, что к началу



XXI века фирма-производитель Parsytec (Германия) уйдет с рынка высокопроизводительных параллельных систем. Развитие параллельных систем и средств параллельного программирования идет на основе моделей параллелизма данных и параллелизма задач. Что же касается архитектуры высокопроизводительных вычислительных систем, то следует прежде всего отличать системы с *разделяемой* памятью и *распределенной* памятью. При этом важнейшим фактором при проектировании подобных систем является *масштабируемость*, то есть возможность расширения архитектуры. Об этом речь пойдет ниже.

### 3. О новых разработках и проектах

**3.1. Высокопроизводительный кластер.** В 2003 г. в ВЦ РАН в рамках программы интеграции науки и высшей школы (научный руководитель академик А.А. Петров ) были начаты работы по установке кластера на процессорах Intel Xeon 2600DP [6]. Кластер имеет следующую архитектуру:

— количество узлов	8
— общее количество процессоров	16
— общий размер оперативной памяти	32GB
— общий размер дискового пространства	288GB
— сетевой интерфейс (вычислительный)	Myrinet 2000
— сетевой интерфейс (управляющий)	Fast Ethernet

Заметим, что каждый из вычислительных узлов кластера представляет классическую двух-процессорную систему класса SMP с разделяемой памятью, выполненную на новых технологиях и реализованную на современных микропроцессорах класса Intel Xeon DP 2600 MHz. Архитектура кластера представляет классическую схему системы с распределенной памятью. Перейдем к рассмотрению кластера в варианте реализации в ВЦ РАН. Узел кластера имеет следующую конфигурацию:

- MB: TYAN Thunder i7500 S2720 UGN, 2xXEON, U160, up12 GB;
- CPU: 2xIntel XEON DP 2600 MHz, 512 cache;
- Memory: 2x1 GB DDR SDRAM, PC 2100, ECC;
- HDD, : 36 GB, IC 35L036, U160.

Как видно из конфигурации вычислительного модуля, в узле предусмотрена возможность расширения оперативной памяти. Эта возможность была использована еще на этапе опытного прогона кластера, и оперативная память каждого узла доведена до 4 Гбайт. Таким образом, объем общей оперативной памяти в настоящее время составляет 32 Гбайт. Вычислительный модуль представляет типовую конфигурацию SMP-системы на базе двух процессоров с общей памятью. Кроме того, материнская плата узла имеет порты связи по *FastEthernet* и *GBEthernet*.

Программное обеспечение кластера включает в себя следующие компоненты:

- *Операционная система: Linux Red Hat 7.3;*
- *Система управления кластером: OSCAR v.1.2;*
- *Компилятор: gcc v.3.2.2;*
- *Низкоуровневой сетевой API: gm v.1.6.3;*
- *Реализация MPI: mpich-gm v.2.4-8, lam v.6.5.7;*
- *Библиотеки: ATLAS v .3.4.1-3 –XEON;*

Перейдем к рассмотрению других разделов кластера. Сеть *FastEthernet/GBEthernet* предназначена для начальной загрузки программ и данных в узлы, а также для передачи служебной информации. Она реализована на базе 12-портового мультиплексора 3C 16592 SS/Dual Speed Hub 12 UTP 10/100, обеспечивающего работу сети в режиме *FastEthernet 100*. Весьма



Вычислительный кластер INTEL Xeon 2600 ВЦ РАН. 2005 г.

существенным является наличие возможности реализации в проекте сети *GBEthernet*. Эта возможность заложена изначально в комплектации материнских плат *GBEthernet*-портами.

Высокоскоростная сеть коммутации узлов в нашем проекте реализована на сети *Myrinet*. Эта сеть характеризуется по своей структуре сегментированием коммутаций, что позволяет передавать по сети несколько пакетов одновременно, каждый из которых может передаваться со скоростью  $(2+2)$  Гбит/с в полнодуплексном режиме. С увеличением числа узлов пропускная способность будет возрастать. Несмотря на то, что пакеты *Myrinet* в общем случае ограничены размером внутренних буферов сетевых интерфейсов, для того, чтобы исключить захват канала, передаваемые сообщения фрагментируются (по умолчанию устанавливается размер кадра 4Кбайт). *Myrinet* работает на более низком уровне и не использует стек протоколов TCP/IP.

В качестве коммутатора выбран вариант *M3F SW 16M*, имеющий  $(16+1)$  портов. На физическом уровне линки (каналы) *Myrinet* реализованы на оптоволоконной технологии, используя для этих целей многомодовое ОВ (оптоволокно) с длиной волны 850 нм. На каждом канале реализован контроль ошибок и управление потоком. Канал содержит ограниченный набор средств управления трафиком, используя при этом приливно-отливные буферы и аппаратную реализацию протоколов. Не менее важным параметром является масштабируемость сети.

Остановимся вкратце на управляющем разделе кластера. Заметим, что в представленном проекте функция управления кластером и функция файлового сервера объединены в один управляющий узел, имеющий следующую конфигурацию:

- CPU: Intel Pentium 4 2260 MHz, 512 Kb cache, 533 MHz;
- MB: ASUSTek P4PE, i845pe, 533 MHz, 3xDDR, UDMA 100;
- Memory: 512 Mb DDR SDRAM DIMM 333MHz (PC -2700);
- HDD: 4x IBM 36 Gb IC35L036, U160;
- NIC : PCI 3COM 3C905C-TX-M;
- SCSI RAID: PCI LSI MegaRaid SCSI 320-1.

Важной частью вычислительного кластера, обеспечивающей его эффективность, является специальное системное программное обеспечение. Речь идет о системе управления кластером. В процессе эксплуатации кластера возникает ряд задач, требующих особого внимания. Основные усилия такой системы направлены прежде всего на поддержание однородности вычислительных узлов, эффективного выделения ресурсов кластера для решения задач пользователей, администрирование и мониторинг систем кластера.

Модульность архитектуры кластера и тот факт, что рассматриваемая вычислительная система является ресурсом общего пользования, накладывает дополнительные требования к решению перечисленных выше задач.

Тестирование кластера проводилось поэтапно. Прежде всего были проведены тесты рабочей коммуникационной сети *Myrinet*. Определялись характеристики взаимодействий, реализованных с помощью библиотек низкого уровня коммуникаций и уровня MPI.

Далее проводились тестирования с целью определения максимальной производительности кластера, масштабируемости и надежности работы. В качестве тестовых программ использовались PMB (Pallas MPI Benchmark), HPL (High Performance Linpack), а также пакет тестов *perftest*, поставляемый производителем *Myrinet*.

Весьма существенный интерес представляют полученные данные тестирования узлов кластера на предмет исследования принципа многопоточности (Hyper-Threading) и его влияния на производительность узла. Эти результаты имеют немаловажное значение в непрекращающейся научной полемике об эффективности этого принципа применительно к кластерным системам. На рис.2 представлена диаграмма измерения производительности на одном узле, имеющем два процессора Intel Xeon 2600, в двух режимах:

- а) два процесса с выключенным режимом Hyper-Threading;
- б) четыре процесса с включенным Hyper-Threading.

Тестирование проводилось на HPL (Linpack). Пиковая, то есть теоретическая производительность узла рассчитывается как  $2 \times 2 \times 2.6 = 10.4$  Гфлопс. В режиме (а) она составляет 5.7 Гфлопс. В режиме (б) производительность узла равна 9.59 Гфлопс. Такие показатели свойственны только последовательным задачам на одном узле. В случае параллельных задач, а это основное предназначение кластерных систем, эти показатели резко снижаются.

Итак, вычислительный кластер Intel Xeon 2600 — неотъемлемая часть локальной сети ВЦ РАН. Рассмотрим основные моменты работы с ним с точки зрения программиста-пользователя. Прежде всего о ресурсах. Пользователь может использовать восемь двухпроцессорных узлов с процессорами Intel Xeon, работающими с частотой 2600 МГц. Каждый узел имеет общую оперативную память 4 Гб (по 2 Гб на процессор). Следовательно, суммарная оперативная память узлов кластера составляет 32 Гб. Узлы имеют свои имена: NODE 1, NODE 2, ... NODE 8.

Кроме узлов, на которых производится исполнение программы пользователя, имеется центральный или управляющий сервер. В нашем случае он имеет имя "broody.ccas.ru". В конфигурации кластера ВЦ РАН — это компьютер с процессором Intel Pentium 4 2260 МГц. Компиляция производится на одном из узлов. Загрузка системы выполняется с управляющего узла.

Каждый пользователь на внешней памяти (диске) управляющего сервера имеет свою файловую систему, где он хранит, в частности, свои исходные тексты на языках высокого уровня (C, C++, FORTRAN 77, FORTRAN 90). Объем дисковой памяти на управляющем сервере составляет  $36 \times 5$  Гб. На каждом узле имеется своя дисковая память такого же объема, и пользователь может хранить некоторые файлы в этих файловых системах сроком до месяца (/tmp/month) или сроком до одной недели (/tmp/week). В центральной файловой системе на центральном сервере (/home/<имя корневой директории пользователя>) срок хранения информации не ограничивается.

Модель программирования на кластере похожа на описанную выше модель на системе PARSYTEC и отличается от нее в основном синтаксисом процедур в библиотеке MPI. На стадии исполнения готовой программы ("счета") в узлы загружаются одинаковые для каждого процесса "коды". Каждому процессу соответствует своя ветвь. Максимальная производительность данного распараллеленного алгоритма будет достигнута, если при загрузке на каждом

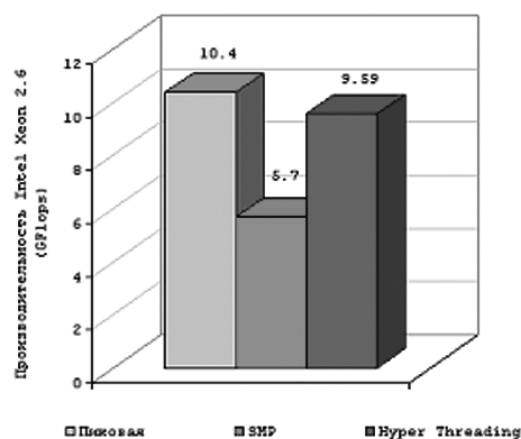


Рис. 2. Производительность узла кластера

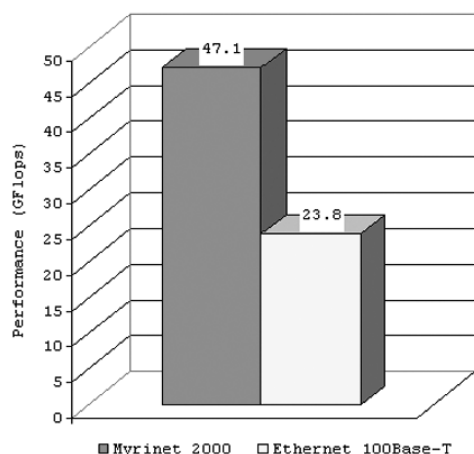


Рис. 3. Производительность кластера на тестовой задаче Linpack. Матрица  $55000 \times 55000$

множество команд PBS. При этом пользователь сообщает системе сведения о своем задании (объем памяти, число процессов и используемых процессоров, время “счета” и т.д.). Исполняемый на множестве процессоров в виде нескольких процессов данный параллельный алгоритм, естественно, должен иметь возможность обмена между процессами. Эти обмены, как уже говорилось выше, производятся с помощью стандартных программ из специальной библиотеки программ, реализующей так называемый интерфейс передачи сообщений MPI (Message Passing Interface). Обмены “память–память” между отдельными процессами производятся с достаточно высокой скоростью с помощью высокоскоростной сети Myrinet (скорость Myrinet до 4 Гбит/с). Эта высокоскоростная сеть используется непосредственно при исполнении (“run”) параллельного алгоритма. Для обмена между центральным сервером и узлами, в частности при загрузке узлов, используется сеть типа FastEthernet.

Эта важная работа с 2004 г. поддерживается грантом РФФИ № 04-07-90346 (руководитель академик А.А. Петров) и находится в стадии постоянного усовершенствования, в первую очередь, в рамках обновления и расширения программного обеспечения. Работы по данной теме, начиная с 2003 г., выполняются рабочей группой в составе М.А. Копытова, Ю.П. Рогова, А.М. Чернецова, Г.М. Михайлова (ВЦ РАН), О.И. Самоварова (ИПС РАН) при активном содействии ООО “С.I.Technology” (Москва).

**3.2. Новая структурированная кабельная сеть ВЦ РАН.** В 2004 г. в ВЦ РАН начата еще одна крупномасштабная работа по созданию новой структурированной кабельной системы (СКС), соответствующей международному стандарту 5-е, на двух площадках, занимаемых институтом (здания по ул. Вавилова 40 и 42). Данная работа требует значительных капиталовложений и выполняется поэтапно, начиная с разработки рабочего проекта, его реализации, инсталляции сети и активного сетевого оборудования, представления исполнительной документации на условиях тендера. Эта комплексная работа выполняется силами двух отечественных организаций: ООО “Академинформ” в части развертывания кабельной сети и ООО “Инлайн технолоджис” — в части поставки, установки и инсталляции сети в целом. Со стороны ВЦ РАН, заказчика проекта, в рабочую группу входят И.В. Байкова, Ю.П. Рогов, В.Ф. Ващенко, Л.И. Ломакина и Г.М. Михайлов (руководитель проекта).

Следует заметить, что термины и понятия структурированных кабельных систем появились в инженерной практике только в 90-х гг. XX в., когда возникла острая необходимость стандартизации параметров кабельных сетей и сред передачи данных в связи с всеобщей информатизацией практически во всех сферах деятельности мировой цивилизации. Без соблюдения этих стандартов в настоящее время не может быть реализована ни одна корпоративная сеть, если она имеет выход на внешнюю телекоммуникационную систему, в первую очередь на INTERNET. Рассмотрим вкратце эти стандарты, основываясь на работе [7]. Базовыми стандартами структурированных кабельных систем являются:

ANSI/TIA/EIA-568-A (США). Стандарт телекоммуникационных кабельных систем коммерческих зданий. Октябрь 1995 г.;

ISO/IEC 11801. Информационные технологии. Структурированная кабельная система для помещений заказчиков. Июль 1995 г.;

EN 50173:1995. Информационные технологии. Структурированные кабельные системы. Июль 1995 г.

Стандарты призваны служить общественным интересам, устраняя недопонимание между производителями и потребителями, обеспечивая взаимозаменяемость и универсальное качество продукции наряду с ее доступностью и грамотным использованием.

Стандарты телекоммуникационной инфраструктуры зданий должны обеспечить работу разнотипного оборудования любых производителей, создание кабельных систем на этапе строительства зданий и их длительную эксплуатацию. По содержанию и областям применения стандарты можно подразделить на три группы: проектирования, монтажа и эксплуатации. Стандарты проектирования определяют среду передачи, параметры разъемов, линии и канала, в том числе предельно допустимые длины, способы подключения проводников (последовательность), топологию и функциональные элементы СКС. Приложения дополняют стандарты в смежных областях и подразделяются на нормативные (часть стандарта) и информационные (для сведения). К этой группе можно отнести также документы, определяющие параметры заземления, особенности СКС малых офисов и жилых зданий, централизованных систем и рекомендации по построению открытых офисов.

Стандарты монтажа определяют в широком смысле телекоммуникационные аспекты проектирования и строительства (комплекса) зданий. Учет телекоммуникационной инфраструктуры подразумевает наличие каналов для прокладки кабелей и помещений для их коммутации и размещения оборудования. В узком смысле под монтажом понимают работы по установке кабельных систем. Второй подход является более дорогостоящим. В данную группу включены также стандарты измерений, поскольку на практике качество монтажа СКС определяется с помощью измерений, которые могут завершать процесс создания систем.

Стандарты администрирования определяют правила документирования телекоммуникационной инфраструктуры и создаются на базе стандартов проектирования и монтажа. Стандарты определяют структуру и параметры слаботочных кабельных систем, устанавливаемых в одном, нескольких или комплексе зданий. Универсальная телекоммуникационная инфраструктура зданий предназначена для передачи сигналов всех типов, включая речевые, информационные и видео. Системы сигнализации, которые устанавливаются в современных зданиях, не освещаются в стандартах СКС (упоминаются в ANSI/TIA/EIA-568-A).

Требования по безопасности (электрической, пожарной и другим видам) и электромагнитной совместимости (ЭМС) определяются другими стандартами и нормативами. Положения базовых стандартов СКС согласуются с нормами безопасности и ЭМС.

Стандарты обеспечивают:

— пользователей структурированной (хорошо организованной) кабельной системой, не зависящей от типа приложений, а также гибкой схемой прокладки кабелей, позволяющей легко и экономично выполнять модификацию системы;

— строителей-профессионалов (например, архитекторов) инструкциями, позволяющими проектировать и строить кабельные системы еще до того, как станут известными конкретные требования пользователей, что обеспечивает планирование строительства и ремонта;

— промышленность и организации стандартизации — кабельной системой, обеспечивающей работу имеющегося сетевого оборудования и базу для разработки новых видов продукции.

Стандарты позволяют создавать среду передачи из элементов различных производителей, благодаря взаимодействию организаций стандартизации друг с другом.

Стандарты США определяют два уровня требований — обязательный и рекомендуемый. Обязательный уровень выражается словом “должен”, рекомендуемый — словами “следует”, “может”, “желательно”. Обязательный уровень задает минимум характеристик и параметры совместимости. Рекомендуемый уровень используется для более полного соответствия параметров СКС требованиям приложений и различных условий эксплуатации. В том случае, если для

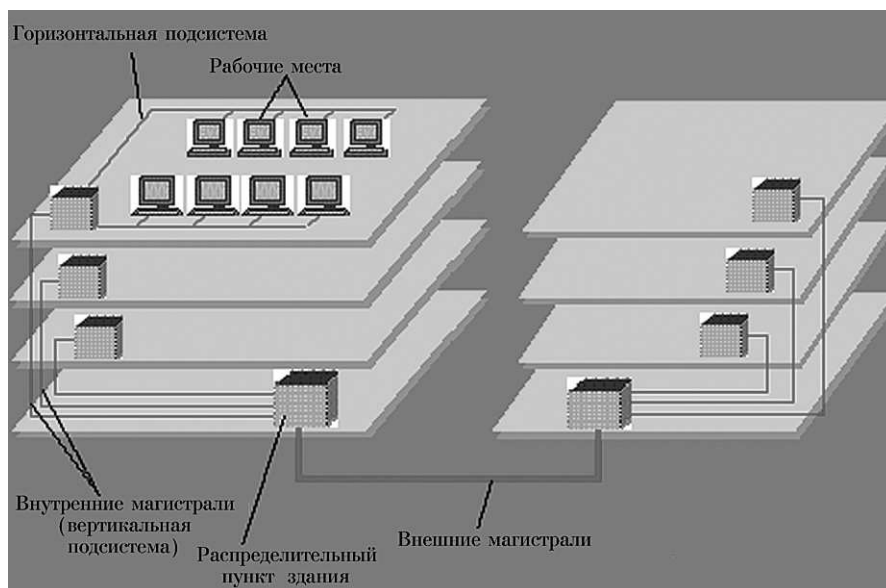


Рис. 4. Общая схема развертывания СКС

одного параметра задаются два уровня, рекомендуемый уровень задает более высокое качество систем и представляет собой верхнюю планку при создании новых СКС.

На рис. 4 представлена общая схема развертывания СКС в условном виде, где выделены основные составляющие системы, как горизонтальные (поэтажные), вертикальные, магистральные части сети в целом.

Так как данная работа носит обзорный характер, она не включает в себя детального анализа каждой составляющей части СКС. Тем не менее для общего понимания проблем проектирования, реализации, инсталляции, документирования и, в конечном счете, эксплуатации системы, представляется вовсе не лишним краткое изложение базовых элементов сети. Одними из важнейших параметров сети являются ограничения, которые определяются теми же стандартами, что описано выше. В первую очередь, к ним относятся ограничения по длине кабеля класса 5-е.

На рис. 5 и 6 представлены типовые схемы развертывания СКС в части горизонтальных подсистем. Представленная схема со всеми ограничениями по длине кабеля имеет непосредственное отношение к нашему проекту, развернутому по классу D (100MHz), выполненному на симметричном кабеле. Заметим только, что наличие в системе поэтажных распределительных панелей РПЭ необязательно, если топология сети позволяет обходиться без них.

Основными параметрами передачи симметричной системы являются:

- волновое сопротивление;
- перекрестные наводки;
- сопротивление цепи постоянному току;
- затухание;
- задержка;
- устойчивость к электромагнитным помехам.

В симметричных кабелях существуют два типа электромагнитных волн: продольные и поперечные моды. Способ передачи поперечными модами подробно описан в классической теории передачи сигналов. Проводники в паре передают идентичные сигналы в противофазе. В идеальном бесконечно длинном кабеле электромагнитные поля, вызванные движущимися зарядами в каждом проводнике, взаимно исключают друг друга, так что суммарное излучение кабеля равно нулю. Подобным образом взаимно исключаются наводки. Таким образом, дифференциальные сигналы определяют характеристики передачи пары, но не влияют на электромагнитные помехи и на электромагнитную совместимость и наводки.

Продольные моды вызваны дисбалансом, в случае, если источник генерирует неидеально симметричные сигналы, а также, если витая пара и приемник неидеально симметричны. Наличие асимметрии обозначает, что два сигнала не равны, что приводит к появлению тока,

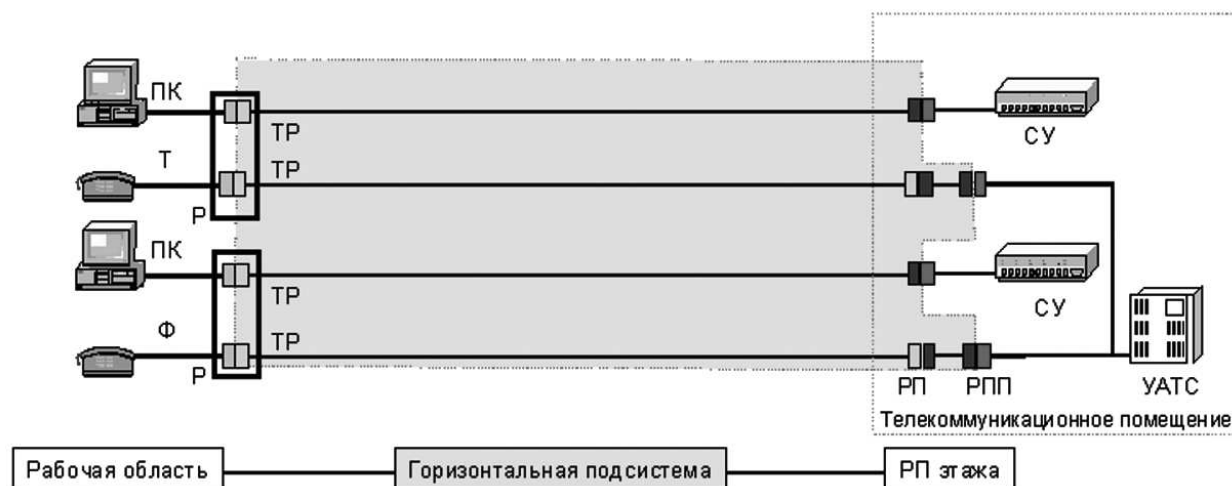


Рис. 5. ПК — персональный компьютер, Т — телефон, Ф — телефакс, Р — розетка, ТР — телекоммуникационный разъем, РП — распределительная панель, РПП — распределительная панель подсистемы, СУ — сетевое устройство, УАТС — учрежденческая автоматическая телефонная станция

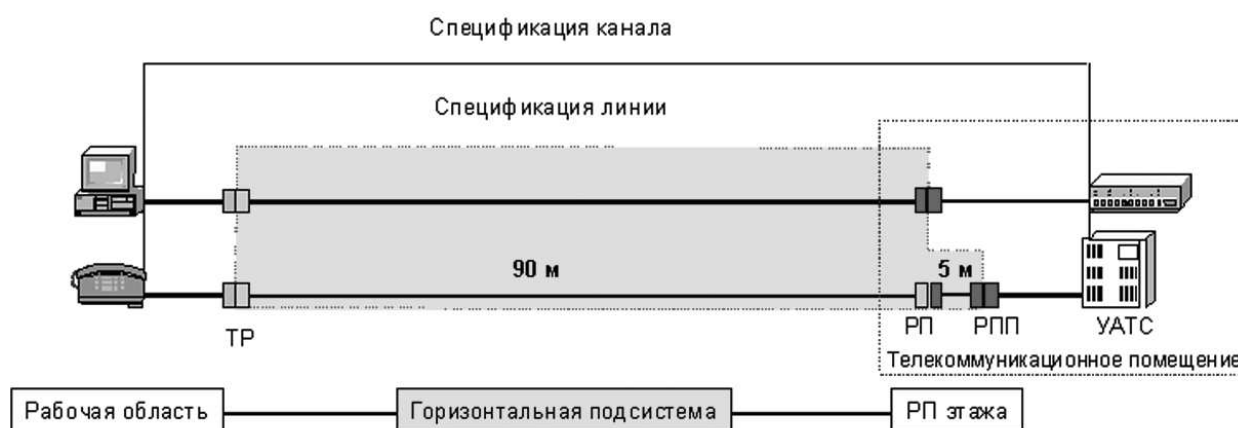


Рис 6. ТР — телекоммуникационный разъем, РП — распределительная панель, РПП — распределительная панель подсистемы, УАТС — учрежденческая АТС (пример оборудования)

протекающего по парам и создающего электромагнитное поле. Подобным образом возникают наводки. Дисбаланс в кабельной системе означает, что электромагнитные поля и наводки со стороны других систем создают нежелательные помехи. Таким образом, продольные моды определяют электромагнитную совместимость и наличие наводок в кабельной системе. Следует отметить, что уровень продольных сигналов зависит от кабеля, передатчика и приемника, и таким образом, электромагнитная совместимость является системным эффектом.

Неоднородности кабельной системы, вызванные преимущественно монтажом, могут преобразовывать небольшую часть поперечных мод в продольные и наоборот. Таким образом, для полной характеристики кабельной системы необходимо произвести измерения поперечных и продольных мод и преобразования поперечных мод в продольные (баланс). Это позволяет полностью учесть электромагнитную совместимость и наводки.

Не углубляясь в теорию длинных линий, к которой имеют непосредственное отношение кабельные системы, работающие на скоростях передачи данных от 100 до 1000 Мбит/с и выше (классы D,E), представляются интересными параметры, которые заложены в основу проекта СКС, развернутой на площадках ВЦ РАН. Они таковы:

- волновое сопротивление (impedance)  $Z = 100 \pm 15\% \sim 120 \pm 15\%$  (1МГц);
- двунаправленные наводки на ближнем конце (NEXT) не менее 24 дБ (100 МГц);

- сопротивление по постоянному току R не более 40 ом на 100 метров;
- затухание не более 24 дБ на частоте 100 МГц;
- задержка не более 5 нс на один метр.

Полученные в процессе сертификационных испытаний данные полностью подтвердили заложенные в проект значения по перечисленным параметрам сети.

### 3.3. GRID. Основные концепции и актуальность проблемы.

*Наши первые шаги.* Наконец, последней наиболее значимой работой, начатой коллективом отдела вычислительных систем и сетей, является проект по развертыванию Grid-узла в рамках выполнения этой программы в масштабе отделения математических наук (ОМН) РАН совместно с ИСП РАН. Опуская общие глобальные проблемы GRID [8], остановимся на конкретной задаче, с решения которой может быть начата эта работа. Речь идет об инструментальной системе Globus Toolkit, которая должна быть установлена в той или иной версии на grid-сервисных машинах для узлов, ресурсы которых должны стать доступными извне. Для того чтобы запустить пользовательскую задачу средствами Globus Toolkit, необходимо выполнить следующие действия:

- установить переменные окружения;
- при первом использовании получить пользовательский сертификат;
- сгенерировать Pгоху-сертификат;
- запустить демон распределения ресурсов;
- выполнить запуск требуемых задач;
- завершить работу демона распределения ресурсов;
- удалить Pгоху-сертификат.

Для успешного использования Globus Toolkit необходимо настроить переменные окружения, так как ряд программных средств используется данным пакетом в процессе работы. Для этого необходимо набрать:

```
export JAVA_HOME=/export/grid/j2sdk1.4.3
export ANT_HOME=/export/grid/apache_ant-1.6.1
export PATH=${PATH}:${JAVA_HOME}/bin:${ANT_HOME}:/bin
export GLOBUS_LOCATION=/export/grid/globus3.2.1
source ${GLOBUS_LOCATION}/etc/globus-user-env.sh
```

Приведенные выше команды написаны в предположении, что используется командный интерпретатор *bash*. Для других интерпретаторов необходимы соответствующие изменения (например, для *sh* вместо команды “*export*” будет команда “*envset*”, а вместо команды “*source*” команда “*.*”).

Приведенную процедуру можно упростить. Для этого существуют два способа. Первый — написать файл, который устанавливает необходимые переменные окружения, и запускать его вместо набора команд. Второй — добавить приведенные выше команды в стартовый скрипт пользователя (рекомендуется только опытным пользователям).

Для создания файла настройки окружения:

- нужно создать файл с содержимым, указанным в п. 1. Пусть для определенности он имеет имя *globusini*;
- затем необходимо выполнить команду *chmod 755 globusinit*, что позволит в дальнейшем интерпретатору выполнять файл;
- после этого для установки необходимых переменных окружения необходимо использовать команду *source globusinit*.

Непременным условием работы в Grid является получение пользовательских сертификатов. В среде Grid принята аутентификация пользователей на основе цифровых сертификатов. Такой сертификат содержит имя пользователя, организацию, подписавшую сертификат, а также открытый ключ, который используется как для идентификации пользователя, так и для шифрования передаваемых сообщений. Помимо этого, пользователь имеет закрытый ключ, который используется для дешифрации сообщений. Поэтому для получения доступа к системе необходимо получить подписанный цифровой сертификат и зарегистрировать его на узлах, входящих



в Grid. Для этого после выполнения инициализации окружения нужно выполнить команду *grid-cert-request*.

В процессе создания сертификата будет запрошен пароль, который необходимо запомнить. После завершения выполнения команды будет создан каталог *.globus* в домашнем каталоге пользователя, а внутри этого каталога файлы *usercert.pem* (пустой), *userkey.pem* и *usercert\_request.pem*. После этого файл *usercert\_request.pem* должен быть передан администратору сегмента Grid для его подписи и внесения необходимых изменений в настройках политики безопасности узлов. Также необходимо сразу запретить чтение приватного ключа другими пользователями с помощью команды: *chmod 400 \${HOME}/.globus/userkey.pem*.

После прохождения регистрации пользователь получает от администратора файл *signed.pem*, который необходимо переместить в *\${HOME}/.globus/usercert.pem*. Это можно сделать командой *mv signed.pem \${HOME}/.globus/usercert.pem*.

Также необходимо запретить изменение этого файла другими пользователями с помощью команды *chmod 644 \${HOME}/.globus/usercert.pem*.

Если доступ к Grid-сегменту будет производиться с различных узлов, то необходимо создать на других узлах каталог *.globus* в домашнем каталоге с помощью команды *mkdir.globus*, скопировать туда файлы *usercert.pem* и *userkey.pem* с узла, на котором производился запрос сертификатов, и установить соответствующие права доступа с помощью команд *chmod 400 \${HOME}/.globus/userkey.pem* и *chmod 644 \${HOME}/.globus/usercert.pem*.

Для повышения безопасности используется не основной сертификат пользователя, а Проху-сертификат. В нем содержится как информация о пользователе, так и ограничение времени действия такого сертификата. Это необходимо для того, чтобы потенциальный злоумышленник, подслушивающий сетевые коммуникации, не смог получить слишком больших привилегий. Также на основе этого Проху-сертификата производится доступ к другим вычислительным узлам, что позволяет выполнять вход в систему только один раз. Проху-сертификат генерируется на основе пользовательского сертификата с помощью команды *grid-proxy-init*.

При выполнении будет запрошен пароль. Необходимо ввести тот же самый пароль, который был введен при запросе сертификата с помощью команды *grid-cert-request*. В результате будет создан временный сертификат, который будет использоваться во всех необходимых случаях.

По умолчанию создаваемый Проху-сертификат будет действителен в течение двух суток с момента создания. В некоторых случаях может потребоваться большее время жизни сертификата. Для этого необходимо указать время жизни при создании сертификата. Тогда команда будет выглядеть так: *grid-proxy-init -valid h.m*, где *h* и *m* — определяют время (часы и минуты соответственно), в течение которого будет действителен сертификат.

Использование данного метода создания Проху-сертификата рекомендуется только в исключительных случаях.

После завершения работы необходимо удалить созданный Проху-сертификат. Для этого используется команда *grid-proxy-destroy*.

Если необходимо обновить Проху-сертификат, то вначале производится его удаление с помощью команды *grid-proxy-destroy* и создание нового с помощью *grid-proxy-init*.

Globus Toolkit предоставляет единый интерфейс для отправки задач, который может работать со множеством различных локальных планировщиков. На кластерах нашего сегмента Grid используется локальный планировщик PBS. Для того чтобы получить возможность запустить свои задачи, необходимо на каждом из используемых кластеров запустить демон. Для этого необходимо произвести вход на все кластеры, установить там переменные окружения и сгенерировать Проху-сертификат. Для запуска демона используется команда: *globus-personal-gatekeeper -start -jmtime pbs*.

В результате выполнения команды получится строка следующего вида: *GRAM contact: omega:39870:/O=Grid/OU=GlobusTest/OU=simpleCA-omega/CN=Maxim Karvonen*.

Содержимое после “GRAM contact:” будем называть контактной строкой. В данном случае, это “*omega:39870:/O=Grid/OU=GlobusTest/OU=simpleCA-omega/CN=Maxim Karvonen*”.

Контактная строка состоит из имени машины, порта и идентификационных данных пользователя. Возможно указание конкретного порта при запуске демона с помощью дополнительного параметра *-port <nport>*. Это позволит не изменять описания задач между различными сес-

сиями работы, но может вызвать конфликты, когда несколько пользователей пытаются указать один и тот же порт.

После окончания запусков задач необходимо остановить запущенный демон с помощью команды *globus-personal-gatekeeper -killall*.

Перед запуском задачи должен быть запущен демон и получена контактная строка. Простейший вариант запуска делается командой *globus-job-run <contact> <executable> <args>*, где *<contact>* — ранее полученная контактная строка, *<executable>* — полное имя исполнимого файла, включая путь от корневого каталога, *<args>* — аргументы выполняемой программы. Если контактная строка содержит пробелы, то она заключается в кавычки. При таком запуске управление вернется пользователю после завершения работы программы. При этом стандартный вход берется из */dev/null*, стандартный выход и поток ошибок возвращаются пользователю.

Существует ряд аргументов, которые изменяют различные характеристики задачи. Они указываются непосредственно после контактной строки:

```
-stdin <file>
-stdout <file>
-stderr <file>
```

Приведенные выше параметры служат для перенаправления входного, выходного и потока ошибок соответственно. Имена файлов считываются с рабочего каталога программы. Рабочий каталог по умолчанию совпадает с домашним каталогом пользователя.

```
-np <N> или -count <N> служит для указания количества запускаемых процессов;
-m <minutes> — максимальное время выполнения задачи;
-p <project> — планировка и учет производятся для проекта <project>;
-q <queue> — производится планирование в очередь queue;
-d <dir> — устанавливает рабочий каталог;
-env <name1>=<value1> -env <name2>=<value2> . . . — служат для установки переменных
```

окружения при выполнении задачи.

Помимо такого запуска можно поставить задачу в очередь на выполнение и продолжить работу. Затем периодически опрашивать состояние задачи и по ее завершении получить результат. Для посылки такой задачи используется команда: *globus-job-submit . . .*

Ее параметры точно такие же, как и у команды *globus-job-run*.

После ее выполнения она возвращает идентификатор задачи, который будет использоваться в дальнейшем. Для проверки состояния задачи используется команда *globus-job-status <jobID>*, где *<jobID>* — полученный идентификатор задачи. На выходе получается один из статусов PENDING, ACTIVE, DONE, FAILED или другие.

Для получения результатов работы используются команды:

```
globus-job-get-output -r <contact> -out <jobID>
globus-job-get-output -r <contact> -err <jobID>
globus-job-get-output -r <contact> <jobID>
```

где *<contact>* — контактная строка, *<jobID>* — идентификатор задачи. Ключи *-out* и *-err* используются для получения выходного потока и потока ошибок соответственно. Если ни один из ключей не указан, то выдается выходной поток задачи.

Для отмены задачи используется команда *globus-job-cancel -r <contact> <jobID>*.

После выполнения или отмены задачи и получения необходимых результатов необходимо освободить ресурсы, используемые для хранения результатов задачи, характеристик и т.д. Для этого нужно выполнить команду *globus-job-clean -r <contact> <jobID>*.

Существует еще один вариант запуска. Он требует написания специального файла спецификации задачи. В качестве типичного примера можно рассмотреть следующий файл:

```
+
( &(resourceManagerContact="shade.msu.ru:35578:/O=Grid/OU=GlobusTest/OU=simpleCA-shade.msu.ru/OU=msu.ru/CN=Max Karvonen")
(count=5)
(label="subjob 0")
(environment=(GLOBUS_DUROC_SUBJOB_INDEX 0))
(executable=/bin/pwd)
```

```
)
(&(resourceManagerContact="shade.msu.ru:35578:/O=Grid/OU=GlobusTest/OU= simpleCA-
shade.msu.ru/OU=msu.ru/CN=Max Karvonen")
(executable=/bin/date)
)
```

Знак + в первой строке означает, что дальше последует описание нескольких подзадач. Описание каждой подзадачи находится внутри пары скобок. Параметр *resourceManagerContact* содержит контактную строку ресурса, на котором будет запущена данная подзадача. Параметр *executable* содержит имя исполняемого файла, который будет выполняться на соответствующем узле. Все остальные параметры являются необязательными и будут объяснены ниже.

(*label*="subjob <n>"): параметр *label* и переменная окружения *GLOBUS\_DUROC\_SUBJOB\_INDEX* используются для сложных задач, когда несколько подзадач на нескольких кластерах должны стартовать одновременно и могут иметь коммуникации друг с другом. Для этого при создании программы должны использоваться библиотеки, входящие в Globus Toolkit. При этом нумерация подзадач должна начинаться с нуля и увеличиваться на единицу для каждой подзадачи.

(*directory*=value): устанавливает начальный каталог для посланной подзадачи.

(*arguments*=value [value] [value] ...): определяет параметры, с которыми будет запущена задача. Если в параметр входит пробел, то необходимо использовать кавычки.

Пример:

```
(arguments= "a and b" ccc d).
```

```
(stdin=value)
```

```
(stdout=value)
```

(**stderr=value**), определяют стандартные потоки ввода, вывода и ошибок для задачи; по умолчанию они равны /dev/null.

(**count=value**) — количество экземпляров программы, которые будут запущены; значение по умолчанию равно 1.

(*environment*=(var value) [(var value)] ...) — переменные окружения, которые будут переданы выполняемой задаче.

(**maxTime=value**), (**maxWallTime=value**), (**maxCpuTime=value**) — приведенные параметры служат для установки максимального времени выполнения. Значения по умолчанию зависят от используемого локального планировщика.

(*jobType*=single|multiple|mpi) — этот параметр служит для задания типа запуска задачи на кластере. Если он установлен в *single*, то будет запущен только один экземпляр исполняемого файла вне зависимости от значения параметра *count*. Если он установлен в *multiple*, то будет запущено *count* экземпляров исполняемого файла. Если же он установлен в *mpi*, то будут использоваться соответствующие методы для запуска программ, использующих коммуникационные библиотеки MPI на кластере. Этому режиму соответствует вызов *mpirun*. При этом программа будет запущена на *count* узлах.

(*queue*=value) определяет очередь планировщика, в которую будет поставлена задача.

(*project*=value) определяет проект планировщика, к которому будет отнесена задача.

(*minMemory*=value) задает минимально необходимый объем памяти для выполнения задачи и измеряется в мегабайтах.

(*maxMemory*=value) задает максимально необходимый объем памяти для выполнения задачи и измеряется в мегабайтах. При таком способе спецификации задача выполняется с помощью команды *globusrun [-w] -f <spec-file>*, где *<spec-file>* — имя файла, в котором содержится спецификация задачи. Указание ключа *-w* позволяет перенаправить стандартные потоки вывода и ошибок на терминал, с которого производился запуск задачи. Управление возвращается после того, как завершились все подзадачи. Для прекращения выполнения можно использовать комбинацию <Ctrl-C>, но в связи с затратами на коммуникацию прерывание задачи может занять некоторое время.

Установка программного комплекса Globus Toolkit на управляющей машине кластера ВЦ РАН выполнена совместно с сотрудниками ИСП РАН А. Аветисяном и О. Самоваровым.

**Заключение.** Представленная авторами статья охватывает описание исторического пути развития вычислительной техники и системного программного обеспечения, начиная с далеких 50-х гг. XX в. по настоящее время, не претендуя при этом на полноту изложения всех проблем. В ней основной акцент сделан на личности, которые в той или иной мере были причастны к 50-летней истории ВЦ РАН. В то же самое время мы считаем, что для будущего читателя не все представленные в статье разделы одинаково интересны в силу его профессиональных предпочтений. Тем не менее, все, что здесь описано и представлено — неотъемлемая часть жизни института, без которой ВЦ РАН был бы немислим, так как его название начинается все-таки со слова “*Вычислительный*”.

### Литература

1. Дородницын А.А. Избранные научные труды. М.: ВЦ РАН, 1997, Т.1.
2. Лебедев С.А. К 100-летию со дня рождения. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002.
3. Говорун Н.Н. Книга воспоминаний. Дубна: ОИЯИ, 1999.
4. Байкова И.В., Копытов М.А., Кулагин М.В., Михайлов Г.М., Рогов Ю.П. и др. Распределенные ИВС. Вып. 1. Локальная сеть ВЦ РАН. М.: ВЦ РАН, 1995.
5. Байкова И.В., Копытов М.А., Кулагин М.В., Михайлов Г.М., Рогов Ю.П. и др. Распределенные ИВС. Вып. 2. Инфраструктура и базовые средства локальной сети ВЦ РАН. М.: ВЦ РАН, 1996.
6. Михайлов Г.М., Копытов М.А., Рогов Ю.П., Самоваров О.И., Чернецов М.А. Параллельные вычислительные системы в локальной сети ВЦ РАН. М.: ВЦ РАН, 2003.
7. Структура СКС // <http://www.ecolan.ru/st-structure.htm>
8. Открытые системы. № 1, январь 2003.

### Персоналии

**Евтушенко Юрий Гаврилович.** Родился в 1938 г. Окончил Московский физико-технический институт в 1962 г. Доктор физико-математических наук, профессор, член-корреспондент РАН, лауреат премии Совета Министров СССР. Главный редактор международного журнала “Оптимизация, методы и софтвер”, издающегося в Англии издательством Гордон и Брич. Специалист в области численных методов оптимизации, автор более 120 научных трудов, в том числе трех монографий. Директор Вычислительного центра им. А.А. Дородницына РАН.

**Копытов Михаил Анатольевич.** Родился в 1937 г. В 1961 г. окончил Московский институт инженеров геодезии, аэрофотосъемки и картографии. Работает в ВЦ РАН с 1966 г. С 1970 г. — заведующий отделом. Научные интересы — системное программирование, практические и теоретические вопросы технологии программирования и сопровождения программ. Автор более 20 научных работ.

**Михайлов Гурий Михайлович.** Родился в 1936 г. Окончил Московский энергетический институт в 1960 г. Кандидат физико-математических наук. Специалист в области суперкомпьютерных вычислительных систем и сетей. Автор более 30 научных работ, соавтор монографий. Заместитель директора Вычислительного центра им. А.А. Дородницына РАН по научной работе.

**Рогов Юрий Павлович.** Родился в 1949 г. В 1971 г. окончил МГЭПИ. В ВЦ РАН работает с 1968 г. В настоящее время в должности главного специалиста по ИВС, специалист в области администрирования и сопровождения программных систем и компьютерных сетей. Автор более 20 научных публикаций.

## АНАТОЛИЙ АЛЕКСЕЕВИЧ ДОРОДНИЦЫН (1910–1994)

(из воспоминаний П.И. Чушкина)

---

Анатолий Алексеевич Дородницын родился 2 декабря 1910 г. в Тульской области в семье врача. Его детские годы прошли на Украине. В 1931 г. он окончил горный факультет Нефтяного института в г. Грозном и затем четыре года был начальником сейсмической партии на Урале, в Башкирии, Туркмении. С 1935 г. А.А. Дородницын переходит на работу в Главную геофизическую обсерваторию в Ленинграде, где большую роль в формировании его научных интересов сыграл выдающийся ученый Н.Е. Кочин. В 1936 г. он поступил в аспирантуру Обсерватории, где его научным руководителем стал профессор И.А. Кибель, и в 1939 г. защитил кандидатскую диссертацию по метеорологии. В 1940 г. А.А. Дородницын поступил в докторантуру Института механики Академии наук СССР в Москве к академику Н.Е. Кочину.

В 1941 г. А.А. Дородницын был приглашен на работу в Центральный аэрогидродинамический институт им. Н.Е. Жуковского (ЦАГИ). Здесь в 1942 г. он защитил докторскую диссертацию о пограничном слое в сжимаемом газе, а в последующие годы продолжил разработку этой темы и выполнил циклы исследований по теории крыла и осесимметричным сверхзвуковым течениям. А.А. Дородницын стал одним из создателей теоретического фундамента реактивной авиации — аэродинамики больших скоростей.

Одновременно с работой в ЦАГИ А.А. Дородницын с 1945 г. вел научно-исследовательскую деятельность в Математическом институте им. В.А. Стеклова Академии наук СССР в должности старшего научного сотрудника, а в дальнейшем возглавлял отдел в Отделении прикладной математики этого института. В 1953 г. Академия наук СССР избрала А.А. Дородницына (минуя избрание в члены-корреспонденты) своим действительным членом. С момента организации в 1955 г. Вычислительного центра АН СССР он являлся его директором, а с 1989 г. почетным директором и научным руководителем Института.

Академик А.А. Дородницын известен как выдающийся советский ученый в области физики атмосферы, аэродинамики, гидромеханики, прикладной и вычислительной математики, информатики. В этих разделах науки им проведены крупные оригинальные исследования, предложены и разработаны эффективные новые методы, получены фундаментальные результаты. Его научное творчество отличают многогранность, неизменно самый высокий научный уровень, постановка и решение проблем, имеющих важное как теоретическое, так и прикладное значение, доведение результатов до законченной формы, пригодной для использования на практике.

Значителен вклад А.А. Дородницына в динамическую метеорологию.

Первые труды А.А. Дородницына (1936–1938 гг.) посвящены изучению общей циркуляции атмосферы и теории фронтального циклогенеза, в частности распределения давления на поверхности Земли в стационарной зональной циркуляции атмосферы. Начиная с 1938 г., он занимался исследованием влияния рельефа земной поверхности на движение воздушных масс. А.А. Дородницын установил, что при обтекании воздушным потоком горного хребта или холма возникает ряд коротких волн. Этот вывод тогда явился совершенно новым, был подтвержден опытными наблюдениями и опроверг общепринятые в то время взгляды.

В теории суточного хода температуры в атмосфере А.А. Дородницыну принадлежит введение (1941 г.) в качестве краевого условия на поверхности Земли условия теплового баланса, ставшего теперь общепринятым условием при прогнозировании погоды и в задачах взаимодействия воздушной и морской сред. В его работах были также рассмотрены такие метеорологические явления, как воздушные течения при прохождении береговой линии, муссонная и бризовая циркуляция, температурные возмущения градиентного ветра.

Плодотворны и фундаментальны идеи и работы А.А. Дородницына в теории пограничного слоя.

Исследование больших скоростей полета потребовало развития теории пограничного слоя в сжимаемом газе. Здесь существенное упрощение теории было достигнуто благодаря предложенному А.А. Дородницыным в 1942 г. преобразованию уравнений для ламинарных течений. Это преобразование, пригодное также для турбулентного случая, приводит уравнения пограничного слоя для газа к виду, аналогичному виду уравнений для несжимаемой жидкости. Оно теперь стало классическим и носит имя его автора. Существо данной идеи настолько неразрывно связано с природой сжимаемости в пограничном слое, что без нее не обходится ни одно современное, будь то аналитическое или численное, исследование пограничного слоя в газе, включая случаи с физико-химическими процессами.

Развивая свою теорию пограничного слоя, А.А. Дородницын в 1944–1948 гг. получил ряд точных решений, разработал для инженерных целей метод определения аэродинамического сопротивления скоростных самолетов и предложил новый путь приближенного расчета течений с теплопередачей и лучистым теплообменом. Вместе с тем им была построена полуэмпирическая теория перехода ламинарного слоя в турбулентный. Позже, в 1960 г., используя возможности современной вычислительной техники, А.А. Дородницын развил для решения проблем пограничного слоя численный метод интегральных соотношений.

Оригинальные и практически важные исследования по вихревой теории крыла опубликованы А.А. Дородницыным в 1943–1944 гг.

Классическая теория несущей линии Прандтля не позволяла рассчитывать аэродинамические характеристики крыльев нового типа (стреловидных, малого удлинения). А.А. Дородницын, установив необходимые математические закономерности, обобщил эту теорию на случай крыла с криволинейной осью или с осью, произвольно наклоненной к направлению потока. Он ввел специальную поправку к циркуляции, учитывающую криволинейность крыла, и для ее определения получил интегро-дифференциальное уравнение, представляющее собой уравнение Прандтля со свободным членом, зависящим от основной циркуляции.

В рамках вихревой теории А.А. Дородницыным была решена также задача об интерференции крыла и фюзеляжа самолета, а именно задача о расчете обусловленного влиянием фюзеляжа изменения циркуляции вдоль размаха крыла. Моделируя эффект фюзеляжа системой распределенных источников и диполей, автор вывел для циркуляции интегро-дифференциальное уравнение и предложил для его решения метод последовательных приближений.

Весьма важными и значительными являются труды А.А. Дородницына в сверхзвуковой газовой динамике, востребованные необходимостью проектирования сверхзвуковых самолетов и ракет.

В серии работ (1949–1951 гг.), посвященных осесимметричным вихревым установившимся течениям газа, проведен анализ уравнений и их решений, дан метод расчета. Построение канонической системы уравнений и исследование ее свойств при аналитических граничных условиях привели к выводу об аналитичности решения. Это сразу позволило преодолеть ряд трудностей, связанных с нелинейностью уравнений и наличием точек излома контура обтекаемого тела. Для областей течения, не содержащих особенностей, был предложен вычислительный алгоритм, использующий разностное представление характеристических соотношений. В областях с особыми точками построены аналитические решения. Ударная волна аппроксимировалась с учетом ее локальной кривизны. В целом был создан простой метод расчета сверхзвукового обтекания тел вращения, который с приемлемой точностью можно было реализовать на простейших счетных машинах.

Вычислительный алгоритм, предложенный А.А. Дородницыным для осесимметричных течений совершенного газа, в дальнейшем лег в основу современного, широко применяющегося численного метода характеристик. Его идеи определили целое направление работ советских аэродинамиков по расчету как двумерных, так и пространственных сверхзвуковых течений газа при наличии равновесных и неравновесных физико-химических превращений.

Фундаментальные результаты получены А.А. Дородницыным в теории асимптотических методов решения обыкновенных дифференциальных уравнений. Его исследования в этой области общепризнаны и породили целое направление как в нашей стране, так и за рубежом.

В статье, опубликованной в 1947 г., найдено асимптотическое решение уравнения Ван-дер-Поля для полного цикла колебаний. Ранее известные решения в двух областях этого цикла не

допускали сопряжения. А.А. Дородницын получил решение в двух дополнительных областях, что сделало возможным определение всего решения.

При исследовании колебательных процессов, которые описываются уравнениями второго порядка с большим параметром и с особенностями в коэффициентах, использование известных методов оказывается неприемлемым. А.А. Дородницын в своем знаменитом основополагающем труде (1952 г.) для получения единого асимптотического решения на интервале, включающем особую точку, ввел более простое эталонное уравнение, которое правильно учитывает особенности решений данного уравнения. Решение исходной задачи выражается через интеграл эталонного уравнения. Эти исследования проведены для тех случаев, когда коэффициент уравнения может иметь нуль или полюс любого порядка.

Велика роль А.А. Дородницына в разработке современных численных методов для интегрирования нелинейных уравнений в частных производных и применения их к актуальным научно-техническим проблемам.

Еще в 1951 г. А.А. Дородницын создал численный метод интегральных соотношений, удобный для применения на ЭВМ. В этом методе система нелинейных уравнений, зависящая от двух переменных, после использования уравнений в интегральной форме и определенного вида аппроксимирования по одной из переменных искомым функциям сводится к системе обыкновенных дифференциальных уравнений; при этом точно учитываются граничные условия для исходной системы уравнений. Численное интегрирование аппроксимирующей системы эффективно проводится по стандартным схемам. В 1960 г. А.А. Дородницын предложил обобщенный метод интегральных соотношений, в котором вводятся сглаживающие функции. Имея свободу в выборе этих функций, можно получить достаточно точное решение уже при небольшом числе узлов интерполяции, что очень важно при практических расчетах.

Метод интегральных соотношений стал мощным вычислительным средством и оказался пригодным для интегрирования систем уравнений в частных производных различного типа. Его развитие и исследование проводилось в Вычислительном центре АН СССР под руководством А.А. Дородницына. Благодаря своей простоте и эффективности этот метод нашел широкое распространение и с его помощью были получены первые, причем высокоточные численные решения нелинейных задач аэродинамики. А.А. Дородницын в 1960 г. на основе данного метода провел исследование ламинарного пограничного слоя на произвольном плоском теле в несжимаемой жидкости, определив всю картину течения вплоть до точки отрыва. В дальнейшем были рассчитаны случаи пограничного слоя в газе при наличии теплопроводности, излучения, отсоса или вдува. В последующем метод интегральных соотношений успешно применялся для расчета ряда сложных, в том числе трехмерных течений: пространственное равновесное и неравновесное сверхзвуковое обтекание затупленных тел, сверхзвуковое движение конуса под углом атаки, взрыв в газе с противодавлением. Этот метод как надежный и удобный аппарат для численных исследований широко использовался отечественными и иностранными специалистами.

Начиная с 1965 г. А.А. Дородницын развивает новые численные методы решения полных уравнений движения вязкой несжимаемой жидкости.

Этим исследованиям предшествовал его труд по неустановившимся плоским движениям тяжелой жидкости, в котором использовался аппарат теории функций комплексного переменного и конечно-разностные аппроксимации. Для интегрирования уравнений Навье–Стокса для двумерных течений А.А. Дородницын разработал метод, основанный на замене граничного условия прилипания более общим условием, содержащим специальный параметр. В первом варианте этого подхода решение представляется в виде ряда по параметру, а в другом, нестационарном варианте вместо параметра вводится функция от времени. Эффективность данного метода продемонстрирована на примерах течения в расширяющемся канале при наличии вихревых зон и течения около полубесконечной пластинки.

Позже, в 1985 г. (работа была опубликована в 1989 г.) А.А. Дородницыным был предложен принципиально новый итерационный метод решения задачи пространственного обтекания тел вязкой несжимаемой жидкостью, сводящийся на итерациях к интегрированию отдельных уже существенно более простых скалярных эллиптических краевых задач. Эта работа и ее идеи явились существенным этапом для создания и развития в ВЦ РАН новых эффективных

и быстрых итерационных методов с расщеплением граничных условий численного решения краевых задач для системы уравнений Навье–Стокса.

Важным проблемам обработки информации был посвящен ряд докладов и публикаций А.А. Дородницына. Он приложил большие усилия, чтобы информатика приобрела статус науки, занимающейся разработкой и анализом вычислительных средств, программного обеспечения и алгоритмов.

Наряду с развитием и внедрением численных методов в прикладной математике и механике А.А. Дородницын с энтузиазмом занимался организацией применения ЭВМ в экономике, медицине, биологии, геологии, для распознавания образов в этих науках, в социологии, музыке. Анализ особенностей и количественная оценка трудоемкости обработки информации в различных областях привели его к обоснованным выводам о перспективных численных подходах к рассматриваемым проблемам и о возможностях использования вычислительных машин и систем. В докладах и статьях по этой тематике изучалось развитие и совершенствование универсальных и специализированных алгоритмических языков, исследовалась их эффективность и давался критический анализ путей автоматизации программирования.

А.А. Дородницына глубоко волновала экологическая проблема защиты окружающей среды, он изучал вопросы математического моделирования взаимодействия человека и биосферы, принимал активное участие в работе общественной экспертной комиссии АН СССР по проблемам повышения эффективности мелиорации. Деятельность этой комиссии позволила предотвратить осуществление губительного проекта переброски на юг вод северных рек.

Наиболее полный список научных трудов А.А. Дородницына представлен в т. 1 двухтомника: А.А. Дородницын. Избранные научные труды. М.: ВЦ РАН, 1997.

Свою научную работу А.А. Дородницын всегда сочетал с преподаванием в высшей школе; он много времени уделял воспитанию научных кадров.

В 1939–1940 гг. А.А. Дородницын — доцент кафедры высшей математики в Ленинградском горном институте, а в 1944–1946 гг. — профессор кафедры теоретической аэродинамики Московского авиационного института им. С. Орджоникидзе. В последующие годы он читал лекции в аспирантуре ЦАГИ. А.А. Дородницын активно участвовал в организации и становлении Московского физико-технического института, с 1948 г. являлся его профессором, а с 1953 г. заведовал кафедрами газовой динамики, прикладной математики и математической физики МФТИ. Его курсы лекций по теории функций комплексного переменного, по теории вязкой жидкости являлись замечательными образцами глубины проникновения в суть предмета, полноты и новизны излагаемого материала.

Многочисленные ученики А.А. Дородницына, ставшие впоследствии докторами наук и членами Российской академии наук, успешно занимаются исследованиями в различных областях прикладной математики, гидромеханики, информатики и др.

А.А. Дородницын являлся председателем Научного совета по вычислительной технике и системам управления ГКНТ и Президиума АН СССР, председателем Комиссии по вычислительной технике Академии наук СССР, заместителем председателя Координационного комитета АН СССР по вычислительной технике. Он во многом способствовал широкой компьютеризации народного хозяйства нашей страны. В кругу его интересов находились работы по созданию прикладных программ и вычислительных систем для научных исследований, автоматизации проектирования и планирования.

Как выдающийся ученый и организатор науки А.А. Дородницын пользовался огромным авторитетом за рубежом. Он неоднократно возглавлял советские делегации на международных научных конгрессах и конференциях. А.А. Дородницын являлся председателем Советского национального комитета в Международном научном комитете по проблемам окружающей среды (SCOPE), представителем нашей страны в Международной федерации по обработке информации (IFIP), пост президента которой он занимал в 1968–1971 гг.

Анатолий Алексеевич деятельно трудился в Координационном совете по вычислительной технике академий наук социалистических стран, в комиссиях по научному сотрудничеству с Вьетнамом и Финляндией. Международным признанием научных достижений А.А. Дородницына явилось избрание его иностранным членом Болгарской академии наук и Технической академии Финляндии, почетным доктором Технического университета г. Дрездена.



Большое значение А.А. Дородницын придавал научно-издательской работе. В 1961 г. им был организован “Журнал вычислительной математики и математической физики”, издаваемый Академией наук, и до последних своих дней он оставался бессменным главным редактором своего детища; он работал членом редколлегии журнала “Кибернетика”. Под его редакцией выпущен целый ряд книг и сборников трудов, а также переводов иностранных монографий. Особо следует отметить участие А.А. Дородницына в издании собрания сочинений академика Н.Е. Кочина.

Весьма обширна и разнообразна научно-публицистическая деятельность А.А. Дородницына, который часто выступал в центральной прессе, по радио, на телевидении, обсуждая актуальные вопросы космонавтики, прикладной математики, кибернетики, вычислительной техники, защиты окружающей среды.

Выдающиеся научные и организационные заслуги А.А. Дородницына высоко оценены Родиной. Ему было присвоено звание Героя Социалистического труда, он был награжден пятью орденами Ленина, орденами Трудового Красного Знамени, Октябрьской Революции, Дружбы народов, Красной Звезды, “Знак почета” и многими медалями. Он был удостоен Ленинской премии, трех Государственных премий, премией Совета Министров СССР, премий им. А.Н. Крылова и им. В.М. Глушкова АН СССР. Ему был присужден ряд зарубежных наград.

Яркий талант, беспредельная преданность науке, неутомимый труд и высокая принципиальность — все эти черты были присущи академику Анатолию Алексеевичу Дородницыну — одному из крупнейших ученых XX столетия.

## ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОМУ ЦЕНТРУ 25 ЛЕТ \*

*А.А. Дородницын*

---

25 лет! Много это или мало? Ответ на такой вопрос неоднозначен. Если 25 лет исполнилось, скажем, институту черной металлургии, то для такого института 25 лет совсем мало. Как бы не трудились его сотрудники, их 25-летние достижения будут лишь малым шагом вперед по сравнению с опытом “черных” металлургов, накопленным за время порядка трех тысяч лет.

Но для Вычислительного центра 25 лет — это историческая эпоха. Ведь вся электронная вычислительная техника насчитывает 35 лет, а вычислительная техника Советского Союза — 28. Поэтому история Вычислительного центра отражает историю вычислительной техники вообще, или, точнее сказать, историю информатики, включающую и саму технику и ее применение. Трудно сейчас без улыбки вспоминать наши первые машины — “Стрелу” и “БЭСМ” (без номера, № 1 ей был присвоен уже тогда, когда появилась “БЭСМ-2”). А ведь 25 лет тому назад нам казалось, что мы обладаем шедеврами человеческого гения.

Но какими бы неуклюжими не были эти “бэби-машины”, они все же десятилетиями многократно повысили вычислительные возможности человека. А это то “количество”, которое переходит в “качество”. Ведь даже самая неуклюжая из наших машин — “Стрела” и та за десять часов своей работы выполняла расчет, для которого человеку-вычислителю, пусть с самой лучшей настольной электрической машинкой, потребовалась бы вся его сознательная жизнь. А это значит: невозможное стало возможным. И десятилетие — 1955-1965 годы — я бы назвал десятилетием победоносного шествия вычислительных методов. Первые применения ЭВМ были направлены на решение задач механики и физики и тех областей техники, которые на них опирались, иначе говоря, на задачи, которые уже имели математическую формулировку. В принципе было известно, как их решать, но со старыми вычислительными средствами для этого потребовались бы десятилетия и столетия. И вот здесь создание ЭВМ сразу обеспечило прорыв фронта.

Я не хочу сказать, что “победоносный марш” — это только заслуга Вычислительного центра. Нет, во всем мире и во многих институтах Советского Союза наши коллеги — прикладные математики — с энтузиазмом ринулись в бой. Но без излишней скромности можно все же сказать, что и наш вклад в расчистку препятствий на пути победного марша был вполне ощутимым.

Вспоминая эти, теперь уже далекие времена, удивляешься тому, как быстро машинные расчеты вошли в практику и приобрели доверие даже самых консервативных конструкторов. Если раньше конструктор использовал расчетные данные только на этапе эскизного или предэскизного проектирования, в основу же проекта закладывались данные эксперимента, то ЭВМ обратили это отношение — конструктор стал больше верить расчетам, чем эксперименту.

Но вычислительная техника не остановилась на обслуживании традиционных для применения математических методов областей. Успех в традиционных областях вселил надежды, что машины позволят произвести переворот и в “описательных” науках, превратить их из “описательных” в “точные”. Первой такой областью, куда широко проникла вычислительная техника, стала экономика. Сначала это было использование ЭВМ для расчетов типа бухгалтерских (здесь также все вычислительные процедуры были строго формализованы). Но эффект принесли не этого рода применения. То, почему сейчас за рубежом порядка 90% ЭВМ используется для экономических расчетов, обусловлено применением их для целей оптимизации планов, минимизации затрат (то есть максимизации прибыли), прогнозов конъюнктуры, то есть таких расчетов, о которых “домашняя бухгалтерия” и не думала.

---

\* Выступление А.А. Дородницына на юбилейной конференции, посвященной 25-летию ВЦ АН СССР.

Трудно сказать, что больше изменилось за 35 лет существования ЭВМ — сама техника (хардвер) или все применения.

Вычислительная техника вошла уже в период “четвертого поколения” (не считая “нулевого” — поискового периода, занимавшего примерно первые десять лет истории ЭВМ). От состояния “быстродействующего арифмометра” вычислительные машины перешли в состояние “собеседника человека”, “соавтора” его научных поисков. И именно благодаря этим новым качествам ЭВМ они настойчиво проникают в такие области науки и человеческой деятельности, которые еще недавно считались “запретными” для математики.

Биология, медицина, геология, проектирование самых различных объектов, социология, прогнозирование развития политической обстановки — все они становятся теперь областями применения ЭВМ. Я уже не повторяю сферу экономической деятельности человека.

Эта “агрессия” вычислительных методов происходит на всей нашей планете, и именно этот процесс характеризует современное состояние использования ЭВМ.

Я уже говорил, что история ВЦ отражает историю информатики вообще. И вот яркая иллюстрация этого утверждения. В момент организации Вычислительного центра мы имели четыре прикладных лаборатории. Все они занимались решением задач для наук “физического цикла” (аэродинамика, механика систем, электродинамика, квантовая физика) или разработкой математических методов решения задач этого класса.

Сейчас мы имеем 12 прикладных лабораторий, из них 6 “классических” (то есть занимающихся применениями к задачам физического цикла), и 6 “неклассических”, занимающихся нетрадиционными применениями математики.

По численности научных сотрудников ситуация такова: в шести “классических” лабораториях занято 108 научных сотрудников, а в шести “неклассических” — 202. Цифры не требуют комментариев.

Я не скажу, что такая перестройка тематики нашего центра была заранее предусмотрена генеральным руководством ВЦ. Нет, если и можно говорить о каких-то достоинствах руководства, то они состояли лишь в том, что ВЦ быстро реагировал на запросы жизни.

В 1957 или 1958 году (не помню уже точно) некоторая комиссия проверяла деятельность ВЦ. В качестве недостатка нашей деятельности нам тогда записали “многотемность”, и мне доставило немало труда убедить комиссию, что никакой многотемности нет, что в действительности у нас (тогда) есть лишь две темы: методы решения уравнений в частных производных и методы решения систем обыкновенных дифференциальных уравнений, и не наша вина в том, что эти методы применимы к решению весьма многих, совершенно различных по физическому содержанию задач.

Что бы сказала аналогичная комиссия сейчас? Где только не встретишь наших сотрудников сейчас? Они рассчитывают ирригационные системы в Ираке, пытаются бороться со своеобразием Черной реки во Вьетнаме, осваивают остров Пинос (бывшее место ссылки каторжников) на Кубе, залезают в венгерские и шведские болота. И не удивительно, что примерно 20% сотрудников ВЦ существуют не на академические деньги, а на средства промышленных министерств.

По-видимому, сейчас комиссия рекомендовала бы снять меня с работы.

Но не следует думать, что для “классиков” уже не осталось новых проблем. Далеко не так. Современные наши ЭВМ считают уже не в 10 тысяч раз быстрее вычислителя-человека, а в 10 миллионов раз. Вычислительные методы по сравнению с “домашней эрой” также усовершенствовались не менее чем в 1000 раз. И все же. То, что мы уверенно можем сейчас решать в области физических наук — это двумерные (в смысле числа пространственных переменных) задачи. А ведь живем мы в трехмерном пространстве (на нашу беду!). Вся мощь современных ЭВМ и математических методов позволяют справляться лишь с относительно простыми задачами для трехмерного пространства. По американским оценкам для того, чтобы можно было эффективно рассчитать аэродинамику реального самолета, необходимы машины с эффективным быстродействием не менее миллиарда операций в секунду. Эта оценка не далека от истины. Но для того, чтобы она была справедливой, “классикам” нужно очень много поработать, найти принципиально новые подходы к решению задач такого порядка трудности. Если бы сегодня вдруг мы получили миллиардную машину, то рассчитать аэродинамические

характеристики реального трехмерного самолета с достаточной точностью мы бы еще не смогли. Так что о завершенности исследований по решению “классических” задач не может быть и речи.

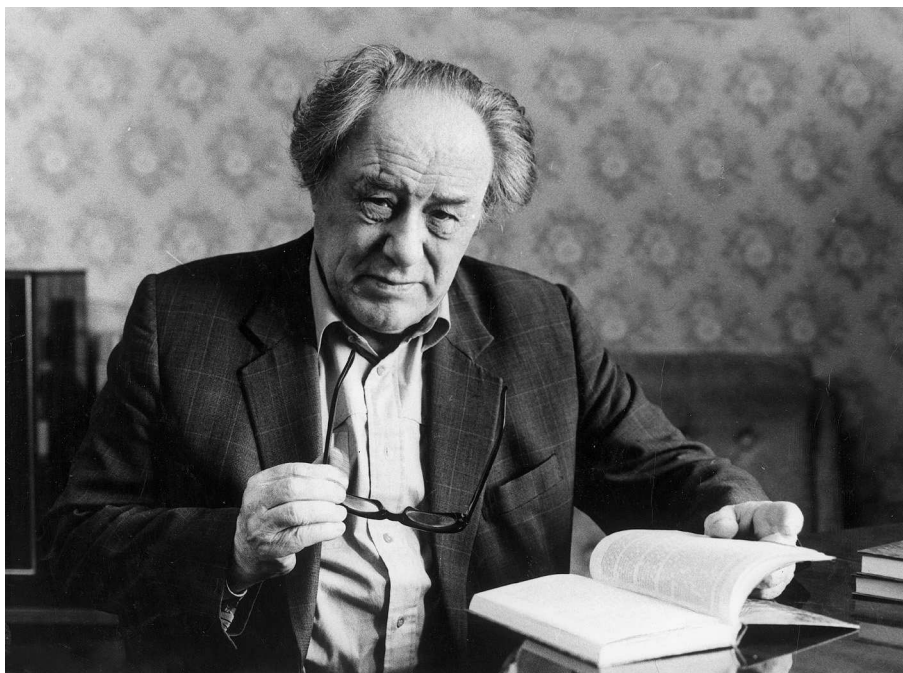
Прошу извинения за многословие. Я кончаю, и в заключение хочу открыть свою мечту: хочется мне, чтобы будущие 10 лет (10, а не 25) работы Вычислительного центра были не менее результативными, чем прошедшие 25.

*А.А. Дородницын*

## НИКИТА НИКОЛАЕВИЧ МОИСЕЕВ (1917–2000)

*А.А. Петров*

---



Никита Николаевич Моисеев родился 23 августа 1917 г. в Москве. Его отец Николай Сергеевич окончил юридический факультет Московского университета и был оставлен при университете “для подготовки к профессорскому званию”. Однако в 1918 г. он был уволен из университета, и его научная карьера не состоялась во многом по вине тогдашнего Наркомпроса Луначарского. Мать Елена Николаевна была приемной дочерью Николая Карловича фон Мекк, сына Надежды Филаретовны фон Мекк, известной по той роли, которую она сыграла в жизни нашего великого композитора П.И. Чайковского. Мать Никиты Николаевича рано умерла, и большую часть жизни он прожил с мачехой, о которой заботился до последних дней ее жизни.

Детство Никита Николаевич провел на Сходне в доме деда Сергея Васильевича Моисеева, который был инженером-путейцем, дослужился до генеральского чина и при советской власти занимал высокий пост в наркомате железных дорог. Это была жизнь русской интеллигентной семьи, в которой интересовались многим, в том числе политикой, литературой, говорили о судьбах России. Не принимая большевизм, надеялись на возрождение России после НЭПа. Суждения деда и отца, по признанию Никиты Николаевича, во многом определили его взгляды на всю жизнь. “Дед и отец — они были искренними русскими патриотами в самом цивилизованном понимании этого слова”, — вспоминал он.

Однако при вступлении в самостоятельную жизнь социальное происхождение сделало Никиту Николаевича изгоем. Его не приняли в Московский университет, хотя вступительные экзамены были сданы успешно. Только вмешательство И.М. Гельфанда и счастливый случай помогли ему стать студентом МГУ.

На старших курсах Н.Н. Моисеев специализировался по теории функций действительного переменного, но не успел окончить университет, как началась Великая Отечественная война. Он был направлен учиться в Военно-воздушную академию им. Н.Е. Жуковского, окончил ее в мае

1942 г. и в звании лейтенанта уехал на Волховский фронт старшим техником по вооружению самолетов. Закончил войну боевым офицером, награжденным орденами и медалями.

Научную деятельность Никита Николаевич начал в авиационном полку. Случайно ему попала немецкая книга по внешней баллистике ракетных снарядов. Прочитав ее, Н.Н. Моисеев существенно упростил изложенный в книге метод, написал 10-страничный трактат и отправил профессору Ю.А. Победоносцеву, у которого учился в академии Жуковского в 1942 г. Ответом был приказ, которым капитан Моисеев откомандировывался на кафедру реактивного вооружения самолетов академии Жуковского.

Кафедру возглавлял профессор Д.А. Венцель. Его Никита Николаевич считал одним из своих учителей: “Благодаря общению с Дмитрием Александровичем я понемногу начал понимать прелесть прикладной науки и задач, возникающих в инженерной практике, которые требуют и остроумия и изобретательности не меньше, чем любые высокие материи. И постепенно осознал, что наука едина, если она действительно НАУКА. Нет наук первого и второго сорта. Они делятся по совсем другим принципам: есть настоящая глубокая наука и есть спекуляции на науке. Другого разделения с тех пор я не признаю”.

Работая на кафедре, Н.Н. Моисеев предложил простой оригинальный метод расчета рассеивания неуправляемых ракетных снарядов, и эти результаты стали основой его кандидатской диссертацией по техническим наукам.

За два-три года Н.Н. Моисеев стал известным специалистом в области динамики управляемых ракет и в 1949 г. ушел из армии. Был принят на работу в ведущий ракетный НИИ и на кафедру МВТУ им. Н.Э. Баумана, выступал с докладами, публиковался и уже писал книгу, которая должна была стать основой докторской диссертации. Но в 1949 г. его мачеху М.В. Моисееву, учительницу младших классов школы поселка Сходня, арестовали по обвинению “в участии подготовки вооруженного восстания” и осудили на 10 лет лагерей. Н.Н. Моисеев был лишен допуска к секретным материалам и уволен с работы. Результаты этого периода его научной деятельности содержались в закрытых отчетах и не были опубликованы.

В 1950 г. Н.Н. Моисеев переезжает в Ростов-на-Дону и, можно сказать, заново начинает научную жизнь в Ростовском университете доцентом на кафедре теоретической механики. Он начинает заниматься гидродинамикой и получает результаты, которые стали содержанием докторской диссертации по физико-математическим наукам. Диссертацию Никита Николаевич успешно защитил в 1955 г. на Ученом совете Математического института им. В.А. Стеклова АН СССР.

В 1955 г. Н.Н. Моисеев получает предложение академика М.А. Лаврентьева занять должность профессора по кафедре “Теория взрыва” Московского физико-технического института и возвращается в Москву. С 1956 г. в течение тридцати лет он был связан с Московским физико-техническим институтом и Вычислительным центром АН СССР, куда в том же году пришел старшим научным сотрудником в лабораторию А.А. Абрамова. В МФТИ Н.Н. Моисеев был одним из инициаторов создания в 1969 г. факультета управления и прикладной математики и его первым деканом. В ВЦ АН СССР существовало более пятнадцати отделов, созданных по инициативе и при участии Н.Н. Моисеева, когда в 1987 г. Никита Николаевич ушел с поста заместителя директора ВЦ АН СССР по науке.

В научном наследии Н.Н. Моисеева легко проследить сочетание высокой математической культуры и острое желание использовать ее для того, чтобы понять существо реальных процессов и явлений. Уже в первых работах, которые принесли ему научный авторитет и известность, отразились главные особенности научного творчества Н.Н. Моисеева: полный математический анализ задачи и интерес к интерпретации математических фактов, способность увидеть те физические и технические следствия, которые эти факты могли иметь. Вокруг Никиты Николаевича собралась большая группа способных молодых исследователей-студентов и аспирантов МФТИ и МГУ им. М.В. Ломоносова. У него было замечательное чутье на новые актуальные задачи. Он видел связь их с теми проблемами, которые были жизненно важны для страны. Особенно ярко это проявилось тогда, когда он искал общие и четкие постановки задач, от решения которых зависит научно-технический и социальный прогресс нашей страны или судьба планеты в целом. Он разрабатывал методологию междисциплинарных исследований

как подход к решению этих задач, искал в методологии место прикладной математики и компьютерных технологий.

Результаты деятельности Н.Н. Моисеева получили высокое научное и общественное признание. В 1966 г. он был избран чл.-корр. АН СССР, а в 1984 г. – действительным членом (академиком) АН СССР. Н.Н. Моисеев был награжден многими орденами и медалями, ему была присуждена Государственная премия СССР и премия Совета Министров СССР. Он был избран членом иностранных академий и научных сообществ, удостоен международных премий.

В 50-х и начале 60-х гг. исследования Н.Н. Моисеева были посвящены задачам гидродинамики и механики. Работая на кафедре университета в Ростове, он подошел к задачам о колебаниях жидкости в ограниченной полости академически, изучая со студентами классический труд Н.Е. Жуковского о движении твердого тела, полость которого заполнена жидкостью. В это же время Н.Н. Моисеев как математик исследовал спектр собственных колебаний тяжелой идеальной жидкости в неподвижном сосуде. Естественным образом он пришел к обобщению задачи Н.Е. Жуковского — к постановке задачи о движении твердого тела, полость которого не полностью заполнена тяжелой идеальной жидкостью. В линейной постановке система уравнений движения тела с жидкостью была выписана в общей операторной форме. Н.Н. Моисеев выяснил, что линейный оператор задачи расщепляется на бесконечномерный положительно определенный оператор и конечномерный оператор, который не обладает определенными свойствами. Далее он действовал как прикладник, прошедший школу Д.А. Венцеля. Он усмотрел, что тело с колеблющейся жидкостью можно описать как механическую систему с бесконечным числом степеней свободы. Задача гидродинамики была отделена от задачи динамики эквивалентного тела, с которым связана бесконечная система математических маятников. Динамические характеристики жидкости с “замороженной” свободной поверхностью вычислялись по методу Н.Е. Жуковского, а колебания свободной поверхности вычислялись через решение задачи о собственных колебаниях жидкости в неподвижной полости. Н.Н. Моисеев доказал полноту главных колебаний системы и обосновал вариационный метод для их вычислений. Это было исчерпывающим решением задачи. Вариационный метод давал возможность эффективно использовать ЭВМ для вычислений динамических характеристик механической системы, эквивалентной телу, содержащему жидкость в полостях сложной формы. В дальнейшем Н.Н. Моисеев распространил эти результаты на задачу о движении упругого тела с колеблющейся идеальной жидкостью внутри полости.

Из теории, построенной Н.Н. Моисеевым, следовало, что для устойчивости равновесия твердого тела, в полости которого может колебаться жидкость, необходима и достаточна устойчивость эквивалентного твердого тела. Это был классический результат, обобщающий известную классическую теорему Н.Е. Жуковского. Из теории следовали и важные практические результаты. На активном участке ракета с жидким топливом может быть описана как твердое (или, точнее, упругое) тело, в полостях которого колеблется жидкость. Уравнения движения такой системы необходимо знать, чтобы стабилизировать ее движение. Так, начав с академической постановки задачи и выполнив полное ее математическое исследование, Н.Н. Моисеев получил прикладные результаты, которые были актуальны для бурно развивавшейся в то время ракетной техники. Методы расчета динамических характеристик тела с жидкостью, которые он предложил, были специально ориентированы на применение ЭВМ в той, тогда в высшей степени актуальной области приложений.

Это — характерная особенность всех работ Никиты Николаевича, которые он выполнил вместе со своими учениками в Вычислительном центре АН СССР. Внимательно следя за развитием вычислительной техники, он не уставал повторять: “Мы должны быть готовы использовать все возможности ЭВМ нового поколения для решения задач народнохозяйственного и государственного значения”.

Итогом исследований движения тел с жидкостью стала монография “Динамика тела с полостями, содержащими жидкость”, написанная вместе с В.В. Румянцевым и опубликованная в 1965 г.

Задачу о колебаниях тяжелой идеальной жидкости в сосуде Н.Н. Моисеев рассмотрел и в нелинейной постановке, применив подход, предложенный А. Пуанкаре. Он искал приближенное решение задачи в виде асимптотического ряда по малому параметру — амплитуде волны — и

показал, что спектр собственных колебаний является не дискретным, а кусочно-непрерывным, а амплитуда колебаний может быть любой из круга сходимости ряда. Рассмотрев задачу о вынужденных колебаниях жидкости в периодическом поле массовых сил, построил вблизи резонанса и вдали от резонанса приближенное асимптотическое решение, вырождающееся в тривиальное решение.

Основные результаты Н.Н. Моисеева в теории нелинейных волн относятся к ее классическим разделам. При общих предположениях им доказано существование волн на поверхности завихренной жидкости. Он развил метод М.А. Лаврентьева конформных отображений узких полос и применил его для асимптотического анализа целого ряда задач о нелинейных волнах на поверхности жидкости.

Исследования задач о нелинейных колебаниях жидкости в начале 60-х гг. подвели Никиту Николаевича к общей проблеме нелинейных колебаний механических систем. Им были разработаны асимптотические методы, основанные на процедурах усреднения и разделения движений. Асимптотическая обработка задач о движении космических аппаратов дала возможность построить экономные численные методы интегрирования уравнений движения.

Исследования нелинейных колебаний завершились в 1969 г. монографией “Асимптотические методы нелинейной механики”.

Начало следующего этапа научной жизни Никиты Николаевича отмечено резкой сменой научных интересов. В начале 60-х гг. он еще продолжал заниматься гидродинамикой и механикой, когда всерьез заинтересовался теорией оптимального управления механическим движением, а затем общей теорией управления сложными системами. В то время на первый план вышли задачи не анализа, а синтеза систем. Первой из такого рода содержательных задач были задачи оптимального управления движением космических и летательных аппаратов. Н.Н. Моисеев сразу понял актуальность этих задач и оценил перспективы развития этого научного направления. Сначала вместе со своими учениками он осваивал классический принцип максимума Понтрягина и искал эффективные численные методы решения краевых задач, к которым сводился расчет оптимальных траекторий. Затем возникла задача об оптимальной траектории космического аппарата в облет радиационных поясов Земли. Формулировка задачи содержала ограничения на фазовые переменные аппарата, поэтому к ней нельзя было применить классический принцип максимума Понтрягина. Никита Николаевич предложил совершенно оригинальный подход к решению таких задач, который он назвал методом перебора в пространстве состояний. По существу, он открыл новое направление в теории разностных методов. Метод, предложенный Н.Н. Моисеевым, оказался универсальным для широкого класса задач механики и получил широкое развитие.

Н.Н. Моисеев сделал очень много для развития методов оптимизации и теории управления в нашей стране. С 1965 г. он начал проводить Всесоюзные летние школы по методам оптимизации и теории управления. Они собирались раз в два года на Украине, в Азербайджане, в Молдавии, в Белоруссии, в Эстонии, на Волге, на Урале, в Сибири, и так продолжалось до 1989 г. Школы способствовали росту научной молодежи практически во всех регионах Советского Союза, очень многие участники школ Моисеева выросли в ведущих специалистов, известных во всем мире. С тех пор во всех республиках бывшего Советского Союза сохраняется неформальное научное и духовное единство, которое называется школой Моисеева.

Собственные исследования задач оптимизации Никита Николаевич завершил монографией “Численные методы в теории оптимальных систем”, опубликованной в 1971 г.

Обстановка начала 60-х гг. будоражила умы, наконец, получили общественное признание идеи и методы оптимального планирования народного хозяйства, еще до войны предложенные академиком Л.В. Канторовичем. Отдавая им должное, в то же время Никита Николаевич, пожалуй, первым преодолел иллюзии, связанные с оптимизационным подходом к управлению народным хозяйством. Дело в том, что оптимизационные модели ограничивались только процедурами планирования хозяйства, в них не учитывались реальные механизмы регулирования производства и обращения. Каждый из субъектов экономики имеет собственные интересы и даже в условиях самой жесткой централизации каждый обладает ресурсом (например, дополнительной информацией), чтобы действовать в соответствии со своими интересами. Никита Николаевич очень быстро это почувствовал. В 1967 г. он докладывал о постановке задачи пла-



нирования, основанной на программно-целевом методе. Предлагал, определяя цели развития и способы достижения целей, учитывать ограничения, возникающие из-за разнообразия интересов людей. И только после того, как определены способы действий, оптимизировать распределение ограниченных ресурсов между работами, из которых состоят способы достижения целей, используя для этого ресурсы ЭВМ.

Так Н.Н. Моисеевым впервые была выдвинута идея сочетания неформальных процедур и математических методов в проблеме управления сложными организационными, технико-экономическими и социально-экономическими системами. Потом она перерастет в общую идею синтеза гуманитарного и естественно-научного знания. А в начале 70-х гг. он предложил теорию иерархических систем и метод имитационного моделирования в качестве инструментов изучения сложных систем, в которых люди одновременно и субъекты и объекты управления.

Рассматривая множественность интересов субъектов в рамках организационной и социальной иерархии и неизбежную неполную информированность субъектов, Н.Н. Моисеев построил информационную теорию иерархических систем. Она основана на модели, которая описывает нетождественность целей системы и отдельных ее элементов и принятие решений каждым из них в условиях неполной информированности. Используя теоретико-игровые конструкции, Н.Н. Моисеев предложил подход к численному анализу и синтезу сложных иерархических систем управления.

Метод имитационного моделирования опирался на новые возможности, которые предоставляли ЭВМ третьего поколения. Имитационное моделирование сочетало в себе математическое описание тех процессов в сложной системе, которые поддаются формализации, и неформальные процедуры имитации операторами тех процедур принятия решений, которые формализации не поддаются. Инструментом имитационного моделирования была диалоговая человеко-машинная система с программным обеспечением проведения имитационных экспериментов и обработки их результатов. Метод имитационного моделирования усовершенствовал технологию проектирования сложных систем, заменяя натурные эксперименты с системой имитационными экспериментами с ее полной моделью на ЭВМ.

Исследования проблем управления сложными системами завершились монографией “Математические задачи системного анализа”, опубликованной в 1981 г.

Н.Н. Моисеев активно пропагандировал свой подход к проблеме управления народным хозяйством, настойчиво, хотя и безуспешно, пытался внедрить свои идеи в сознание высшего государственного руководства. “...Все было тщетно, — вспоминал Никита Николаевич, — ...по-иному и быть не могло... Наша государственная, политическая и экономическая система была уникальным созданием Природы. Именно Природы! Ее никто не создавал по какому-то задуманному плану. Она возникла в результате внутренних причин развития организации, тех изначальных стимулов, которые в нее были заложены еще в процессе революции”. Здесь уже отчетливо намечена целостная концепция развития сложных систем.

Однако прежде чем Никита Николаевич пришел к ней, прошло несколько лет интенсивной работы над глобальной моделью биосферы. Это был последний период научной жизни Никиты Николаевича в Вычислительном центре АН СССР.

О кибернетическом описании эколого-экономических систем Н.Н. Моисеев писал еще в 1977 г., применяя свою информационную теорию иерархических систем. Проблемами математического моделирования процессов в биосфере он начал интересоваться в конце 70-х гг. и обсуждал их с Н.В. Тимофеевым-Ресовским. В процессе работы над моделью Н.Н. Моисеев воспринял учение В.И. Вернадского о ноосфере и развил концепцию коэволюции человека и природы. К тому времени уже были широко известны работы Форрестера и Медоуза по глобальной динамике. Отправной точкой исследований Никиты Николаевича была критика этих работ. Он разработал программу, целью которой было создание системы моделей, описывающих взаимодействия процессов в биосфере и человеческой активности. На первом этапе была построена модель взаимодействия процессов в атмосфере и в океане, влияющих на погоду и климат. Никита Николаевич работал над этой моделью вместе со своим учеником В.В. Александровым, который проводил численное исследование модели и вычислительные эксперименты с ней.

Когда американский астроном К. Саган опубликовал сценарий возможных последствий ядерной войны между США и СССР, Н.Н. Моисеев уже имел модель, на которой можно было проверить сценарий Сагана и дать количественные оценки состояния атмосферы и океана.

Расчеты, проведенные В.В. Александровым, обнаружили феномен “ядерной зимы”. Эта работа принесла Никите Николаевичу мировую известность, но намеченная программа осталась невыполненной. Трагически пропал В.В. Александров, началась перестройка, и финансирование научных исследований сокращалось. Позже Никита Николаевич написал: “Само по себе исследование феномена ядерной зимы было более чем второстепенным событием в той большой работе, которую я задумал. . . Но именно “история ядерной зимы”, которая сначала меня особенно не интересовала, получила широкую известность и сделала большую рекламу всему направлению, которое я начал развивать в Вычислительном центре Академии наук СССР. В то же время научные результаты, которые мне представлялись наиболее интересными, так же как и общее понимание смысла проблемы “человек-биосфера” или особенностей самоорганизации материального мира, остались просто незамеченными, а вероятнее всего, и непонятыми”.

Результаты исследований глобальных экологических проблем были изложены в монографии “Человек и биосфера”, написанной в 1985 г. вместе с В.В. Александровым и А.М. Тарко.

В 1987 г. Никита Николаевич Моисеев ушел в отставку с поста заместителя директора по науке Вычислительного центра АН СССР. Последний период его жизни был связан с экологической организацией “Российский Зеленый Крест”, Международным эколого-политологическим независимым университетом, Российским комитетом UNEP, президентом которых он был до конца своей жизни. Последние годы его жизни были наполнены интенсивной интеллектуальной и духовной работой, осмысливанием философских проблем естествознания, проблем синтеза естественных и гуманитарных наук, страстной публицистикой, темой которой были судьба России и ответственность интеллигенции.

Исследования проблем глобальной экологии, стабильности биосферы и антропогенных воздействий на процессы в ней привели Н.Н. Моисеева к критическому осмыслению представлений о значении природы в развитии общества и о роли человечества в процессах планетарного масштаба. Развивая идеи Пуанкаре, Бора, Вернадского, он создал оригинальную концепцию, названную универсальным рационализмом. В рамках этой концепции Н.Н. Моисеев пришел к новому пониманию принципов коэволюции человека и природы и понял необходимость новых нравственных императивов как условия сохранения человека в качестве биологического вида *Homo sapiens* на планете.

Свою концепцию Никита Николаевич строил как математик и как философ. Он построил и исследовал математическую модель регуляторных свойств биоты и в то же время настойчиво указывал на необходимость синтетического подхода естественных и гуманитарных наук к проблемам природы и человечества. В концепции универсального рационализма он предложил схему мирового процесса самоорганизации, которая сочетала в себе подходы естествознания и философии. Концепция покоилась на эмпирических обобщениях и переварила в себе фундаментальные достижения науки XX в. Основные гипотезы о связанности всех элементов Вселенной, множественности представлений сложной системы, случайности и неопределенности, которые свойственны явлениям мира, об отборе и т. д. являются философскими осмыслениями фундаментальных положений современных наук о неживой и живой природе. Основываясь на исходных гипотезах, Н.Н. Моисеев представил общую картину коэволюции природы и общества. Применяя общие положения универсального эволюционизма к анализу современного антропогенеза и цивилизационных разломов, он не только предупреждал о катастрофах, грозящих техногенной цивилизации, но выявлял их эволюционные и экологические основания, намечал пути общественного развития, на которых их можно было бы избежать.

Никита Николаевич Моисеев был патриотом России в самом истинном, высоком смысле. С болью переживал он смутное время, наставшее в России в 1992 г., но не только переживал, но и активно пытался противостоять пошлости недоучек, объявивших себя элитой нашего общества. Это нашло отражение в его публицистике, многочисленных публичных выступлениях. Он писал и говорил о единстве естественнонаучного и гуманитарного знания, формировании мировоззрения, традициях российской науки и роли Учителя, о русской интеллигенции и месте России в мире. Он был романтиком и оптимистом, несмотря ни на что верил, что слово, обращенное к людям, найдет отклик и даст плоды. Никита Николаевич Моисеев прожил долгую, яркую и нелегкую жизнь. В конце ее сверкнула еще одна грань его таланта. В 1994 г. он написал книгу “Как далеко до завтрашнего дня. . . Свободные размышления. 1917–1993 гг.”. Эта книга о его судьбе и его работе, которые так тесно переплелись с судьбой его страны.

**Основные труды Н.Н. Моисеева**

1. Движение твердого тела, имеющего полость, частично заполненную идеальной каплевой жидкостью // Доклады Академии наук СССР. Т. LXXXV, № 4. 1952. С. 719–722.
2. Задача о движении твердого тела, содержащего жидкие массы, имеющие свободную поверхность // Математический сборник. 1953. Т. 32, № 1. С. 61–96.
3. Теорема существования и неединственности вихревых волн периодического типа // Прикладная математика и механика. Т. 24, № 4. 1960. С. 711–714.
4. Вариационные задачи теории колебаний жидкости и тел с жидкостью // Вариационные методы в задачах о колебаниях жидкости и тел с жидкостью. М.: ВЦ АН СССР, 1962. С. 1–118.
5. Методы динамического программирования в теории оптимального управления. Ч. I. Системы, допускающие использование шкалы управлений // Журнал вычислительной математики и математической физики. 1964. Т. 4, № 3. С. 485–494.
6. Методы динамического программирования в теории оптимального управления. Ч. II. Общий случай аддитивных функционалов // Журнал вычислительной математики и математической физики. 1965. Т. 5, № 1. С. 44–56.
7. Динамика тела с полостями, содержащими жидкость. М.: Наука, 1965. 439 с. (совместно с В.В. Румянцевым).
8. Асимптотические методы нелинейной механики: Учебн. пособ. для студ. университетов и физико-техн. учебн. заведений. М.: Наука, 1969. 379 с.
9. Численные методы в теории оптимальных систем. М.: Наука, 1971. 424 с.
10. О некоторых задачах теории иерархических систем управления // Проблемы прикладной математики и механики. М.: Наука, 1971. С. 30–43 (совместно с Ю.Б. Гермейером).
11. Имитационные системы // Экономика и организация промышленного производства. 1973. № 6. С. 39–46 (совместно с Ю.Г. Евтушенко, П.С. Краснощековым, Ю.Н. Павловским).
12. Элементы теории оптимальных систем. М.: Наука, 1975. 528 с.
13. Математик ставит эксперимент. М.: Наука, 1979. 223 с.
14. Системный анализ динамических процессов биосферы: системный анализ и математические модели // Вестник АН СССР. 1979. № 1. С. 97–108.
15. Математические задачи системного анализа: Учебн. пособ. для студ. вузов, обуч. по спец. “Прикладная математика”. М.: Наука, 1981. 487 с.
16. Человек. Среда. Общество: Проблемы формализованного описания. М.: Наука, 1982. 240 с.
17. Модели экологии и эволюции. М.: Знание, 1983. 64 с.
18. Люди и кибернетика. М.: Молодая гвардия, 1984. 234 с.
19. Человек и биосфера: Опыт системного анализа и эксперименты с моделями. М.: Наука, 1985. 271 с. (совместно с В.В. Александровым и А.М. Тарко).
20. Алгоритмы развития. М.: Наука, 1987. 304 с.
21. Рациональное общество и судьба России // Вестник АН СССР. 1989. № 12. С. 29–39.
22. Анализ равновесия биологических систем с использованием стохастических моделей // Доклады Российской академии наук. Т. 329, № 1. 1993. С. 14–16.
23. Сумерки России: Рассвет или закат? Россия на перепутье // Полис: Политические исследования. 1993. № 1. С. 7–16.
24. Биота как регулятор и проблема sustainability // Журнал вычислительной математики и математической физики. Т. 34, № 4. С. 533–544.
25. Современный антропогенез и цивилизационные разломы: Эколого-политологический анализ // Вопросы философии. 1995. № 1. С. 3–30.
26. Современный рационализм. М.: МГВП КОКС, 1995. 376 с.
27. Информационное общество как этап новейшей истории // Информационные технологии и вычислительные системы. 1996. № 1. С. 3–8.
28. Время определять национальные цели. М.: Изд-во МНЭПОУ, 1997. 256 с.
29. Быть или не быть... человечеству? М., 1999. 288 с.
30. Экология и ноосфера // Экология и жизнь. 1999. № 3(11). С. 10.
31. Низко кланяюсь долготерпению народа, к которому принадлежу. Завещание акад. Никиты Моисеева // Новая газета. 2000. 6–12 марта. № 9. С. 10.
32. Моисеев Н.Н. Как далеко до завтрашнего дня... Свободные размышления. 1917–1993. (Приложение: Воспоминания о Н.Н. Моисееве). М.: Тайдекс Ко, 2002. 488 с.
33. Избранные труды. В 2-х тт. Т. 1. Гидродинамика и механика. Оптимизация, исследование операций и теория управления. 376 с. Т. 2. Междисциплинарные исследования глобальных проблем. Публицистика и общественные проблемы. М.: Тайдекс Ко, 2003. 264 с.

**Публикации о Н.Н. Моисееве и его творчестве**

(в хронологическом порядке)

1. Большой энциклопедический словарь. Математика. Под редакцией Ю.В. Прохорова. Статья “Моисеев Никита Николаевич”, Издательство Большая Советская Энциклопедия, 1988 г., стр. 726 (трижды переиздан за прошедшее время в виде репринта).
2. В связи с кончиной Н.Н. Моисеева в 2000 г. были опубликованы статьи в память о Никите Николаевиче Моисееве:
  - *Лесков С.* /Известия, 03.03.2000;
  - в журнале “Прикладная математика и механика”. 2000. Т. 64. Вып. 3. С. 509–511;
  - в Журнале вычислительной математики и математической физики. 2000. Т. 40, № 7. С. 1119–1120;
  - в журнале “Экология и жизнь”. 2000. 1 (14). С. 3–5;
  - COMPUTATIONAL MATHEMATICS AND MATHEMATICAL PHYSICS. 2000. Vol. 40, № 7. P. 1076.
3. *Тарко А.М., Пархоменко В.П.* Учение Н.Н. Моисеева о биосфере и его развитие в математических дисциплинах // Современные проблемы цивилизации. Научные труды МНЭПУ. Вып. 6. М.: Изд-во МНЭПУ, 2001. С. 81–93.
4. *Тарко А.М., Пархоменко В.П.* Создан виртуальный музей Н.Н. Моисеева // Экология и жизнь. 2001. № 2. С. 9.
5. *Лесков Л.В.* Работа мысли — напряженная и плодотворная // Свободная мысль XXI. 2002. № 8. С. 9–17.
6. *Примаков Е.М.* Выдающийся сын Отечества. (Предисловие к выпуску журнала, посвященного 85-летию Н.Н. Моисеева) // Свободная мысль XXI, 2002 г., № 8, с. 4-5.
7. *Рахманинов Ю.* О книге Моисеева Н.Н. “Размышления о современной политологии. М.: МНЭПУ, 1999, 212 с. // Свободная мысль XXI. 2002. № 8. С. 122. (В разделе “Новые книги”)
8. *Ларин И.И.* Он учил беречь Землю. Серия: “Жизнь замечательных ученых”. М.: Росэкопресс, 2002. 236 с.
9. *Тарко А.М.* Н.Н. Моисеев о проблемах развития биосферы и общества // Свободная мысль XXI. 2002. № 8. С. 61–69.
10. *Тарко А.М.* Учение Н.Н. Моисеева о развитии биосферы и общества // Атлас временных вариаций природных антропогенных и социальных процессов. Природные и социальные сферы как часть окружающей среды и как объекты воздействия. Т. 3. М.: Научный мир, 2002. С. 12–19.
11. *Ратнер В.А.* Генетика, молекулярная кибернетика: Личности и проблемы (статья “Памяти академика Н.Н. Моисеева”). Новосибирск: Наука, 2002. С. 67.
12. *Сигал И.Х., Иванова А.П.* Введение в прикладное дискретное программирование (посвящение — “Памяти академика Н.Н. Моисеева”). М.: Физматлит, 2002.
13. *Петрухин А.И.* Теория самоорганизации вселенной и взгляды Н.Н. Моисеева на проблемы устойчивого развития // Россия на пути к устойчивому развитию. М.: МГИУ Правительства Москвы, Издательский Дом НП, 2003. С. 154–166.
14. *Тарко А.М.* Научные взгляды и предложения Н.Н. Моисеева о путях и средствах решения проблем природы и общества // Россия на пути к устойчивому развитию. М.: МГИУ Правительства Москвы, Издательский Дом НП, 2003. С. 139–153.
15. *Раушенбах Б.В.* Праздные мысли; “Автор ядерной зимы Н.Н. Моисеев”. М.: Аграф, 2003.

## ОТДЕЛ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МЕТОДОВ

*А.А. Абрамов, А.И. Александрович, Н.Б. Конюхова, Б.В. Пальцев*

---

Отдел был образован в самом начале при создании Вычислительного центра АН СССР как лаборатория теоретических исследований. Через несколько лет эта лаборатория была переименована в отдел вычислительных методов. Отдел с момента его образования по 1991 г. возглавлял профессор А.А. Абрамов, с 1991 г. по настоящее время заведующим отдела является профессор Б.В. Пальцев. Структура отдела с течением времени неоднократно претерпевала изменения. В отделе, насчитывавшем в среднем 20 сотрудников, работало (в разное время) 13 докторов, более 30 кандидатов наук.

Основным направлением работ отдела является разработка и исследование методов решения различных актуальных задач вычислительной математики, возникающих в механике, математической и теоретической физике, решение важных прикладных задач. Главной характерной чертой работы сотрудников отдела, позволяющей добиваться значительных и фундаментальных результатов, является то, что она, как правило, базируется на проводимых теоретических исследованиях возникающих и сопутствующих математических проблем, представляющих и самостоятельный научный интерес. Это привело к усовершенствованию и модификациям разрабатываемых, а также и к созданию принципиально новых методов, что дало возможность решать те задачи, которые в связи с трудностью их решения до этого не решались или решались в ограниченных постановках и с недостаточной точностью. Кроме того, такой подход позволил создать по некоторым из направлений работ достаточно целостные математические теории.

За прошедшие 50 лет число публикаций сотрудников и аспирантов отдела, в их числе ряда обзоров, книг и монографий, превысило 800. Ввиду ограниченности объема данного обзора даются краткие описания основных, наиболее значимых направлений работ отдела. В целях сокращения в списке литературы приводятся зачастую ссылки на более поздние публикации, так что заинтересованный читатель сможет при желании дополнить приведенный список многими представляющими для него интерес достаточно важными работами сотрудников отдела по имеющимся в публикациях ссылкам.

**Перенос граничных условий и решение регулярных краевых задач (КрЗ) для систем линейных обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ).** Разработан эффективный универсальный метод переноса граничных условий (вариант метода прогонки) в [1] – для одного линейного ОДУ второго порядка, в [2] – для общих систем линейных ОДУ. Эти методы осуществляют перенос (по отрезку изменения независимого переменного  $t$ ) линейного многообразия значений искомых функций, удовлетворяющих ОДУ и граничному условию, как целого. Это важно, в частности, при решении КрЗ на длинных интервалах, так как в этом случае отдельные решения, порождающие это многообразие, могут дать совокупность значений, близкую к вырождению. Решение возникающей задачи Коши (ЗК) для той вспомогательной системы (нелинейных) ОДУ, которая непосредственно решается, существует на всем отрезке изменения  $t$ ; это решение меняется настолько плавно, насколько плавно перемещается переносимое многообразие. В [1] доказано, что если решаемая двухточечная КрЗ хорошо обусловлена, то применение метода [1] дает численно устойчивые результаты. В [3] исследована обусловленность результирующей системы линейных алгебраических уравнений, возникающей при применении каких-либо вариантов метода прогонки. Первые численно устойчивые методы решения КрЗ со связанными краевыми условиями (условиями периодичности) предложены в [4]. Для различных типов ОДУ были предложены и другие методы переноса граничных условий, учитывающие специфику КрЗ и рассматриваемых ОДУ (см., например, [5–7] и следующий раздел данной статьи). В [8] разработан метод решения общих многоточечных КрЗ и задач с условиями интегрального типа. В [9, 10] предложен и исследован метод решения некоторых классов жестких КрЗ, содержащих большой параметр, сводящийся к решению вспомогательных

КрЗ без большого параметра; метод является итерационным, сходящимся тем быстрее, чем больше значение параметра.

**Теоретические основы и аналитико-численные методы решения сингулярных задач для систем ОДУ. Приложения к моделям в естественных науках.**

*Сингулярные КрЗ и устойчивые начальные многообразия.* На протяжении многих лет в отделе разрабатываются теория и методы переноса граничных условий из особых точек для систем (не)линейных ОДУ, заданных на бесконечном интервале изменения независимого переменного  $t$  или вырождающихся по  $t$  в конечных точках. Изучены вопросы правильной постановки предельных условий в особой точке и их точного или приближенного переноса в близкую неособую точку для корректной аппроксимации сингулярных КрЗ регулярными КрЗ. Значения решений, удовлетворяющих таким условиям, порождают в фазовом пространстве устойчивое начальное многообразие (УНМ), зависящее от  $t$  как от параметра. Перенос граничных условий из особой точки осуществляется решением возникающей локальной сингулярной ЗК, описывающей изменение по  $t$  УНМ как целого, что приводит к фиксации УНМ при регулярных значениях  $t$  в окрестности особой точки. Возможность построения УНМ как целого (без изучения сложного поведения отдельных решений внутри УНМ) породила красивые сопутствующие математические проблемы — однозначно разрешимые сингулярные ЗК для систем нелинейных ОДУ (для описания поведения по  $t$  линейных УНМ) и для систем квазилинейных уравнений с частными производными (УрЧП) первого порядка (для описания поведения по  $t$  нелинейных УНМ), а также интересные алгебраические задачи. Полученные здесь результаты представляют существенный самостоятельный интерес.

Начало теории и методов положено в [11], где для систем линейных ОДУ с регулярной особенностью поставлена и решена проблема переноса из особой точки условия ограниченности решения. Первые результаты по переносу условий ограниченности решения из иррегулярной особой точки для достаточно широких классов систем линейных ОДУ получены в [12] и др. работах. В [11, 12], в частности, показано, что поведение линейного УНМ по  $t$  является гладким в отличие от отдельных решений, гладкость которых может нарушаться в особой точке. Это поведение описывается решением сингулярной ЗК для матричного уравнения типа Риккати; в [12] поставлены и исследованы более общие однозначно разрешимые сингулярные ЗК для классов систем нелинейных ОДУ, включающие сингулярные ЗК для матричных уравнений типа Риккати как частный случай. В [13] введено теоретически и практически важное понятие допустимого граничного условия в особой точке для однородной системы линейных ОДУ и в случае регулярной особенности дано решение задачи о выделении всех таких условий — построении всех возможных линейных УНМ. В [14] изучено поведение граничных условий, переносимых в окрестности регулярной особой точки; методы решения сопутствующих алгебраических задач предложены в [13, 15]. В [16, 17] выделены классы допустимых граничных условий для систем линейных ОДУ с иррегулярной особой точкой и более общей неинтегрируемой особенностью, описано поведение УНМ по  $t$  и сингулярно входящему в ОДУ большому параметру. Эти классы включают в себя такие практически важные предельные условия как условия типа излучения. О других работах этого направления см., например, в [6, 18–20], где наряду с дополнительными исследованиями отражено состояние теории в разные годы; из последующих работ укажем [21–24].

Наряду с [12] в последующих работах, например в [25, 26], поставлены и исследованы однозначно разрешимые сингулярные ЗК для достаточно широких классов систем нелинейных ОДУ; они охватывают и некоторые задачи, непосредственно возникающие в приложениях, например, в астрофизике и космологии. Результаты работ [25, 26] оказались также востребованными для корректной постановки нелинейных сингулярных КрЗ с граничными условиями типа существования конечного предела в особой точке. Обобщения теорем существования и единственности решения сингулярной ЗК (или задачи без начальных данных) для класса систем нелинейных функционально-дифференциальных уравнений (ФДУ) с (не)вольтерровыми операторами и (не)суммируемой особенностью получены, например, в [27] и цитированных там работах. Рассмотренные системы ФДУ включают в себя системы (обобщенных) ОДУ, в том числе с отклоняющимся аргументом, системы интегродифференциальных уравнений

(ИДУ) и др. Развитие этого направления было стимулировано, в частности, задачами квантовой механики для сингулярных ИДУ типа Шредингера с нелокальными потенциалами.

С проблемами решения линейных КрЗ с особенностями имеют дело также следующие работы. В [28, 29] предложены и исследованы методы решения сингулярных КрЗ, возникающих при применении метода прямых для решения УрЧП эллиптического типа в неограниченных областях или областях неправильной формы. В [30] получены первые результаты по переносу граничных условий из бесконечности для некоторых систем линейных дифференциально-алгебраических уравнений (ДАУ). В [18, 31] для некоторых линейных эволюционных задач для УрЧП в пространственно неограниченных областях были предложены методы замены заданных условий поведения решения на бесконечности эквивалентным условием на границе ограниченной области и тем самым осуществлено сведение таких задач к решению начально-краевых задач в ограниченных областях (это направление получило, в частности, развитие в работах других авторов).

Создание разделов теории гладких УНМ для систем нелинейных ОДУ было начато в 70-е гг. В [32] и цитированных там работах поставлены и решены задачи по переносу граничных условий из иррегулярной особой точки для некоторых классов систем нелинейных ОДУ. На бесконечном интервале по независимой переменной  $t$  рассматривается система нелинейных ОДУ с экспоненциально дихотомической главной линейной частью и ставится задача о выделении всего семейства решений, стремящихся к нулю при  $t \rightarrow \infty$ , т. е. построении в фазовом пространстве нелинейного УНМ, порожденного значениями решений этого семейства. Предполагается, что заданные в ОДУ функции являются голоморфными функциями по искомым переменным в окрестности начала координат фазового пространства. Поведение нелинейного УНМ по  $t$  описывается решением сингулярной ЗК для системы квазилинейных УрЧП первого порядка. В предположениях работы [32] такое УНМ является аналитическим многообразием, зависимость которого от времени определяется асимптотическими рядами по неположительным целым степеням  $t$ . Это позволяет строить УНМ приближенно и получать тем самым приближенные граничные условия в конечной точке. При  $t \rightarrow \infty$  такое УНМ стремится к УНМ предельной автономной системы, которое описывается с помощью сингулярной задачи типа Ляпунова для системы квазилинейных УрЧП с вырождением по начальным данным. Аналогичные задачи для систем нелинейных ОДУ с регулярной особенностью при  $t = 0$  исследованы в [33], где, в частности, было замечено, что сопутствующую описанию УНМ сингулярную ЗК для системы УрЧП первого порядка с вырождением на начальной гиперплоскости можно отождествить с частным случаем сингулярной задачи типа Ляпунова. Состояние разделов нелинейной теории в 80-е гг. кратко отражено в [18, 19].

В последующих работах были ослаблены условия, налагаемые на гладкость рассматриваемых систем нелинейных ОДУ и на их главные линейные части (линеаризаторы), вплоть до обобщенных ОДУ и асимптотически автономных систем. В силу единой схемы построения УНМ, описанной, например, в [32], достаточно изучать только сопутствующие сингулярные ЗК (или задачи без начальных данных) для систем квазилинейных УрЧП первого порядка при различных предположениях. В этом направлении достаточно общие теоремы получены в [34, 35] и цитированных там работах.

Отдельно проведены исследования автономных систем нелинейных ОДУ на бесконечном интервале независимого переменного  $t$  с точками (псевдо)гиперболического равновесия в фазовом пространстве. Инвариантные по  $t$  гладкие УНМ в окрестности такой точки описываются с помощью решения сингулярной задачи типа Ляпунова для системы квазилинейных УрЧП первого порядка с вырождением по начальным данным в этой точке. Задачи типа Ляпунова для описания дифференцируемых (необязательно аналитических) УНМ, их частные случаи (в том числе для систем нелинейных ОДУ с регулярной особенностью) и применения к корректной постановке и аппроксимации сингулярных нелинейных КрЗ изучены, например, в [36–38] и цитированных там работах, где даны также приложения результатов к конкретным прикладным задачам.

Существование нелинейного УНМ в окрестности начала координат фазового пространства установлено в [39] и для достаточно общих систем нелинейных ФДУ, рассматриваемых на полубесконечном интервале по независимой переменной  $t$  в декартовом произведении фазовых пространств, т. е. в виде двух подсистем. Теоремы статьи [39] (и других работ этого на-

правления) обобщают, в частности, известные теоремы существования многообразий условной устойчивости по Ляпунову для систем нелинейных ОДУ.

*Методы решения однопараметрических спектральных КрЗ (регулярных и сингулярных).* На основе созданных методов локального устойчивого переноса граничных условий из особых точек, вариантов устойчивого в целом переноса краевых условий и дополнительных алгоритмических приемов в отделе разработаны эффективные устойчивые численные методы поиска спектра и вычисления нормированных собственных функций (СФ) самосопряженных, а также и несамосопряженных сингулярных КрЗ для систем ОДУ, вычисления несобственных интегралов от СФ без вычисления самих СФ и без хранения в памяти ЭВМ какой-либо промежуточной информации. Обзор некоторых таких методов дан в [5]. Для однопараметрических спектральных задач при произвольной размерности систем ОДУ методы и алгоритмы расчета собственных значений (СЗ), СФ и функционалов от СФ вещественного дискретного спектра (включая сингулярные КрЗ) достаточно полно изложены в [6], где также перечислены некоторые приложения методов к решению конкретных задач. В [40] предложены и исследованы экономичные методы вычисления спектра, СФ и несобственных интегралов от них в сингулярных самосопряженных спектральных задачах для векторных систем ОДУ второго порядка, основанные на матричных преобразованиях типа Прюфера и методах переноса граничных условий из особых точек. В работах [41–43] для общих гамильтоновых систем линейных ОДУ, в том числе для систем ОДУ с особенностями и нелинейным вхождением спектрального параметра (СП) (в предположениях монотонной зависимости от СП матриц системы и граничных условий), предложены и исследованы новые варианты метода прогонки, позволяющие вычислять общее число точек спектра, лежащих на заданном интервале вещественной оси. Введено понятие номера СЗ, и дан метод вычисления СЗ с заданным номером. Для одного ОДУ второго порядка в [44] предложен и исследован метод решения самосопряженной задачи Штурма–Лиувилля со связанными граничными условиями и нелинейным вхождением СП в ОДУ и граничные условия. В [45] дана постановка и предложен метод решения нелинейной по СП самосопряженной спектральной задачи для класса систем линейных ДАУ.

Несамосопряженные спектральные КрЗ (или самосопряженные с нелинейным вхождением СП) для систем линейных ОДУ на отыскание точек дискретного спектра на комплексной плоскости СП являются весьма сложными спектральными задачами. Для решения сингулярных несамосопряженных задач типа Штурма–Лиувилля (и задач с непрерывным спектром) для одного комплексного ОДУ второго порядка удобным оказался вариант устойчивой дифференциальной прогонки [46], который широко применялся в сочетании с методами движения по параметрам. Важным достижением отдела являются разработанные общие методы локализации комплексных СЗ и их вычисления. Для КрЗ, аналитически зависящих от СП, в [47, 48] и цитированных там работах разработаны топологические методы и методы типа принципа аргумента (хотя функции, к которым непосредственно применяются методы, не являются аналитическими) для вычисления совокупности СЗ, лежащих в заданной области комплексной плоскости СП.

*Многopараметрические спектральные задачи и специальные функции.* К числу теоретически мало исследованных и особо сложных для численного решения спектральных задач относятся многопараметрические, которые, в частности, встречаются в ряде важных конкретных приложений. В отделе получены значительные достижения по разработке методов решения таких задач и их применению.

С начала 80-х гг. в отделе (по инициативе Акустического института и при поддержке ИФП и ИАЭ АН СССР) разрабатывались универсальные методы расчета сложных специальных функций, возникающих при разделении переменных в трехмерном уравнении Гельмгольца в сфероидальных (сплюснутых и вытянутых) и эллипсоидальной системах координат (СК). Такое разделение приводит к сингулярным самосопряженным задачам Штурма–Лиувилля для угловых волновых сфероидальных функций (ВСФ), где роль СП играет параметр разделения; к двухпараметрической самосопряженной спектральной задаче для системы из двух слабосвязанных ОДУ второго порядка (для угловых волновых эллипсоидальных функций (ВЭФ)) с двумя СП как параметрами разделения и к задачам с непрерывным спектром для ОДУ второго порядка на полубесконечном интервале (для радиальных ВСФ и ВЭФ). Здесь и далее под слабо-



связанной понимается система ОДУ, в которой каждое ОДУ содержит только одну компоненту искомого СФ и связано с другими ОДУ только искомыми СП. Необходимость вычисления ВСФ и ВЭФ, а также решения некоторых задач квантовой физики привела к разработке высокоэффективных модификаций амплитудно-фазового метода решения сингулярных самосопряженных задач Штурма–Лиувилля и задач с непрерывным спектром, в том числе при наличии больших параметров и при сильных осцилляциях решений [49–53]. Основой разработки устойчивых методов вычисления несобственных интегралов от СФ дискретного спектра (без вычисления самих СФ) послужила работа [54]; для интегралов от СФ непрерывного спектра метод развит в [51].

На основе метода фазовых функций в [55, 56] и других статьях разработаны и исследованы быстросходящиеся процессы глобального поиска спектра в двух- и трехпараметрических самосопряженных КрЗ для слабосвязанных систем ОДУ второго порядка и методы вычисления сразу нормированных СФ с заданным числом узлов по каждой компоненте. В частности, созданы универсальные алгоритмы расчета угловых ВЭФ как СФ двухпараметрической КрЗ. Разработке общих методов предшествовали работы [57, 58] по вычислению точек дискретного спектра в сингулярной двухпараметрической самосопряженной спектральной задаче, связанной с высокоточным вычислением уровней энергии ионизированной молекулы водорода и подобных ионов. Эта задача возникает при разделении переменных в уравнении Шредингера в сферической СК. Для ее решения был предложен и обоснован глобально сходящийся итеративный метод с использованием метода фазовых функций.

Работа [55] стимулировала создание общих методов решения многопараметрических спектральных задач. В [59] разработан общий подход к решению многопараметрических самосопряженных спектральных задач для слабосвязанных систем ОДУ второго порядка, возникающих при разделении переменных для УрЧП. В [60, 61] разработан новый метод решения многопараметрических самосопряженных КрЗ для слабосвязанных систем ОДУ второго порядка при произвольном числе СП, в том числе для ОДУ с особенностями. Метод дает возможность вычислять СЗ и СФ при заранее заданном числе нулей по каждой из компонент СФ.

Практически важный класс составляют также сложные многопараметрические самосопряженные КрЗ для слабосвязанных систем ОДУ второго порядка. Один подход к решению таких задач осуществлен в [62, 63] на примере решения двухпараметрических самосопряженных сингулярных КрЗ, возникающих в задачах радиофизики, с применением методов переноса граничных условий из особых точек, варианта прогонки из работы [46] и методов движения по параметрам.

*Корректная постановка и методы решения сингулярных нелинейных КрЗ.* Основой правильной постановки сингулярных КрЗ для систем нелинейных ОДУ, их корректной аппроксимации регулярными КрЗ и аналитико-численного исследования являются результаты по сингулярным ЗК и гладким нелинейным УНМ в сочетании с использованием параметрических рядов Ляпунова, методов оптимальной стрельбы (с УНМ) по граничным данным на несингулярном конце интервала (с минимизацией целевых функционалов) и других итеративных методов.

*Аналитико-численные решения и исследования конкретных прикладных задач.* Методы, изложенные выше, применялись к решению многих конкретных задач из различных областей физики и техники, в том числе совместно с сотрудниками различных институтов АН, высших учебных заведений и отраслевых институтов, а также совместно с некоторыми зарубежными партнерами (Венгрия, Швеция, Португалия, Англия).

*Задачи физики твердого тела и ядерной физики.* Эти задачи объединяет использование “неполного” метода Галеркина для приближенного решения многомерного уравнения Шредингера в (гипер)сферической СК с выбором базиса только по угловым переменным из (гипер)сферических функций, для отбора которых используются групповые свойства модели. Для неизвестных базисных функций, зависящих от (гипер)радиальной переменной, возникают спектральные задачи для векторных систем линейных ОДУ второго порядка на полуоси и с особенностью в нуле. Цикл работ по расчету мелких акцепторных и донорных состояний в полупроводниках выполнен совместно с ИРЭ и МИИТ (см., например, [64]); расчеты использовались специалистами для развития применяемого в промышленности метода фотоэлектрической спектроскопии примесей в полупроводниках. Большой цикл работ выполнен совместно

с ИТЭФ и ИАЭ по решению задач ядерной физики и квантовой хромодинамики на связанные состояния, резонансы и рассеяние частиц (см., например, [65, 66] и библиографию в [40]); результаты исследований использовались в ИТЭФ для развития теории элементарных частиц и подготовки новых физических экспериментов.

*Задачи радиофизики.* Задачи, поставленные в ИФП, сводятся (разделением переменных в уравнениях Максвелла) к решению спектральных задач для комплексных ОДУ второго порядка и слабосвязанных систем таких ОДУ, заданных на полубесконечном интервале и с особенностями в нуле или внутри интервала. В [46] рассматривалась задача В.А.Фока о распространении электромагнитных волн от вертикального диполя, расположенного над абсолютно проводящей сферой Земли (решались сингулярные несамосопряженные задачи типа Штурма-Лиувилля). В [67] рассматривалась задача, описывающая эксперимент по волновой диагностике плазменного шнура П.Л.Капицы (математическая модель эксперимента была предложена Л.А.Вайнштейном): решалась задача рассеяния радиоволн на плазменном цилиндре в предположении, что диэлектрическая проницаемость плазмы есть монотонно возрастающая функция расстояния от оси цилиндра; величины, измеряемые в эксперименте, определялись решением задач с непрерывным спектром для комплексных ОДУ второго порядка с особенностью в нуле и движущейся особенностью внутри интервала, т. е. с особенностью, положение которой на оси зависит от параметра. Решена также задача о скин-эффекте в плазменном шнуре — явлении проникновения электромагнитной волны в плазму. Результаты исследований использовались в ИФП для сравнения с экспериментальными данными и уточнения математической модели эксперимента.

В [62, 63] решались сложные несамосопряженные двухпараметрические сингулярные спектральные задачи для слабосвязанных систем линейных ОДУ второго порядка по расчету комплексных квазичастот собственных внешних осесимметричных электрических колебаний идеально проводящих вытянутых и сплюснутых сфероидов как открытых резонаторов. В целях сравнения с результатами статьи [62] разработанные в отделе методы вычисления ВСФ применялись для расчета характеристик излучения открытого резонатора в форме вытянутого сфероида при различных видах его возбуждения.

*Задачи акустики и теории оболочек.* Разработанные в отделе эффективные методы вычислений ВСФ и ВЭФ применялись к решению широкого круга задач (в том числе и другими авторами). В частности, по инициативе Акустического института решались задачи дифракции плоской звуковой волны на акустически идеальных вытянутых и сплюснутых сфероидах и трехосных эллипсоидах в широком диапазоне изменения параметров задач, в том числе для сфероидов и эллипсоидов больших волновых размеров. Внешние КрЗ с условиями излучения на бесконечности для трехмерного уравнения Гельмгольца решались методом разделения переменных в сфероидальной и эллипсоидальной СК (см., например, [68, 69] и приведенную там библиографию). В [70] методы вычисления ВСФ применялись для приближенного решения задач обработки сигналов и изображений. В [56] решалась трехпараметрическая самосопряженная спектральная задача для нахождения частот собственных колебаний акустической среды внутри трехосного эллипсоида как полого замкнутого резонатора.

Достаточно сложные и разнообразные сингулярно возмущенные сингулярные КрЗ для систем линейных ОДУ поставляет теория свободных колебаний в вакууме и теория собственных и вынужденных колебаний в сжимаемой среде тонкостенных замкнутых вытянутых упругих оболочек вращения, а также задачи дифракции плоской звуковой волны на вытянутых упругих телах или оболочках вращения, заполненных акустической средой: неоднородные КрЗ с особыми точками, в том числе с разрывными элементами матрицы системы и обобщенными функциями в правых частях ОДУ; сингулярные КрЗ для гамильтоновых систем ОДУ на отыскание вещественных СЗ со сложным распределением сгущающегося спектра; сингулярные КрЗ на отыскание комплексных СЗ вблизи вещественной оси для изучения резонансных свойств оболочек в сжимаемой среде, и др. Такие задачи возникают при (асимптотическом) разделении переменных в системе УрЧП теории оболочек типа Лява и при различных асимптотических подходах, использующих входящие в задачу малые параметры (малая толщина оболочки или ее сильная вытянутость). Большой цикл работ этого направления (см., например, [71, 72]), выпол-

нен совместно с Акустическим институтом, в котором результаты исследований использовались для развития теории приемно-излучающих систем и их практического применения.

*Задачи квантовой механики.* В [73] методы вычисления обобщенных ВЭФ, возникающих при разделении переменных в трехмерном уравнении Шредингера в эллипсоидальной СК, применялись для решения задач квантовомеханического рассеяния частиц на “эллипсоидальных” потенциалах, появляющихся в моделях молекул в квантовой химии. К задачам квантовой химии относятся также задачи, решенные в [57, 58]. В [51–53] разработаны методы решения задач квантовой механики на связанные состояния и рассеяние частиц, сводящиеся к ОДУ второго порядка с потенциалами достаточно общего вида. В [53] методы применялись к задаче об атоме водорода в однородном электрическом поле. Задача возникает при разделении переменных в трехмерном уравнении Шредингера в параболической СК и является одной из признанно сложных задач квантовой механики (она важна для развития методов лазерной спектроскопии материалов). В [53], в частности, указано на неточные постановки в других работах сингулярных задач с параметрами для возникающих здесь ОДУ второго порядка на полуоси и с особенностью в нуле, на неверные или необоснованные подходы к решению этих задач, приводящие к расхождениям в расчетах. Для задачи рассеяния электрона на ядре атома водорода в присутствии однородного электрического поля задействован весь “арсенал” вычислительных средств. Указано, что для более строгого решения задачи о Штарк-эффекте (снятии вырождения энергетических уровней атома водорода в электрическом поле) следует поставить и решать двухпараметрическую несамосопряженную сингулярную спектральную задачу (аналогичную задачам в [62, 63]).

*Задачи устойчивости солитонов в нелинейной теории поля.* Исследования устойчивости в рамках линейной теории возмущений точных или численно найденных регулярных решений нелинейных волновых уравнений и систем таких уравнений, определенных во всем пространстве, приводят к сложным спектральным задачам для векторных систем ОДУ второго порядка на полуоси с (не)линейным вхождением СП. Цикл работ по решению таких задач выполнен совместно с ИТЭФ [74, 75].

*Применение к некоторым нелинейным задачам механики несжимаемой жидкости.* В ряде работ, начиная с [37, 38], даны корректные постановки и предложены аналитико-численные методы исследования (на уровне автомодельных решений) трех сингулярных КрЗ механики несжимаемой жидкости, сводящихся к решению на (полу)бесконечном интервале автономных систем нелинейных ОДУ, обладающих в фазовом пространстве бесконечным множеством точек псевдогиперболического равновесия: о двумерном течении в слое смешения при нулевом градиенте давления (в рамках теории пограничного слоя), о трехмерном осесимметричном течении вблизи вращающегося диска бесконечно большого радиуса, а также вблизи бесконечной неподвижной плоскости при вращении над нею жидкости с постоянной угловой скоростью на бесконечности, в том числе и при наличии магнитного поля. В частности, устранены порой существенные неточности, допущенные при постановке этих задач в публикациях некоторых авторов.

В [76] и других работах даны корректные постановки и проведено аналитико-численное исследование сингулярных ЗК и КрЗ для нелинейных ОДУ второго порядка типа Эмдена—Фаулера (на примере конкретных задач астрофизики, атомной физики и теории пограничного слоя). В частности, сингулярная КрЗ с вырождением по фазовой переменной в граничной точке возникает в теории пограничного слоя, а именно в задаче обтекания бесконечной пластины потоком несжимаемой жидкости со степенным законом для касательного напряжения. Получены новые аналитические результаты для этой известной задачи, связанные с выделением однопараметрических семейств решений, ограниченных в точке вырождения ОДУ, и построены верхние и нижние функции в явном виде.

*Нелинейные задачи релятивистской космологии.* В [77] и цитированных там работах совместно с ИТЭФ были начаты исследования по изучению объектов типа сферических пузырей, порожденных скалярными полями Хиггса (ПХ) в пространстве Минковского. Решалась (методом характеристик) начально-краевая задача для нелинейного волнового уравнения в сферически-симметричном случае на полуоси (по радиальной переменной) с особенностью в нуле. Найдены пульсирующее решение типа пузыря, излучающего энергию на бесконечность, и

долгоживущие малые локализованные осциллирующие решения типа бризеров. Устойчивость последних (а также устойчивость точных решений типа бризеров для уравнения Клейна-Гордона и синус-уравнения Гордона) изучалась в [74]. Эти исследования связаны с поисками моделей элементарных частиц, классические образы которых описываются ПХ в пространстве Минковского.

С середины 90-х гг. выполнен большой цикл работ по правильной постановке, качественному анализу и аналитико-численному исследованию сингулярных ЗК и КрЗ для нелинейных ОДУ второго порядка, возникающих в моделях релятивистской космологии со скалярным нейтральным ПХ или системой таких взаимодействующих полей. В [78] дано строгое математическое описание динамики сферических доменов (пузырей) ПХ в пространствах Минковского, Фридмана и де Ситтера в приближении тонкой стенки, когда можно пренебречь толщиной оболочки пузыря по сравнению с его радиусом. Нелинейные ОДУ второго порядка в этом приближении вырождаются по фазовой переменной (при коллапсе пузыря), имеют особенность по временной переменной  $t$  при  $t \rightarrow \infty$  и в случае пространств Фридмана — особенность при  $t = 0$ .

В [79–81] поставлены и изучаются сингулярные задачи для описания различных объектов в космологических моделях ранней Вселенной — инфляционной космологии, когда пространство-время аппроксимируется пространством де Ситтера и в нем изучаются скалярные нейтральные ПХ и порожденные ими объекты. В результате многочисленных исследований в отделе была предложена наиболее общая математическая постановка задачи, охватывающая ранее полученные результаты. В [81] рассматриваются системы  $N$  взаимодействующих ПХ в  $(D + 1)$ -мерном пространстве де Ситтера ( $D \geq 1$ ,  $1 \leq N \leq D$ ). Для полученной системы  $N$  нелинейных волновых уравнений в гиперсферической СК ставится задача о нахождении регулярных решений, существующих и ограниченных во всем пространстве-времени и удовлетворяющих на бесконечности (по пространственным переменным) определенным условиям (выхода на вакуумы ПХ). Решение этой задачи ищется в классе автомодельных функций: для самоподобных объектов различной пространственной симметрии (доменных стенок, уединенных волн, (гипер)пузырей, (гипер)струн и (гипер)монополей) получено общее нелинейное ОДУ второго порядка с параметрами, характеризующими объект, и с двумя конечными и бесконечно удаленной регулярными особыми точками. Даны корректная постановка сингулярной КрЗ на интервале между конечными особыми точками, математический анализ ее разрешимости и продолжимости ее решений на весь бесконечный интервал, изучены проблемы множественности решений и их асимптотического поведения на бесконечности. Более ранние исследования и конкретные расчеты приведены в [79] для случая  $D = 3$ ,  $N = 1$  и в [80] для случая  $D = 3$ ,  $N = 2, 3$  (см. также работы, цитированные в [79–81]).

**Методы исследования и решения задач линейной алгебры (и их обобщений для операторов в гильбертовом пространстве).** В [82–86] предложены и исследованы эффективные методы вычисления СЗ и собственных векторов (СВ) матриц высокого порядка, получаемых, в частности, при использовании метода Галеркина; методы имеют своей основой быстро сходящийся итерационный процесс, главная часть которого — решение соответствующей задачи для матриц существенно меньших порядков.

В [13, 15] разработаны эффективные методы численного нахождения инвариантных подпространств линейных преобразований, возникающих при решении ОДУ с особенностями. В [87–90] предложен и исследован метод решения линейной задачи исключения (задачи вычисления заданного линейного функционала от решения линейного уравнения без вычисления самого решения); метод особенно эффективен в применении к плохо обусловленным и некорректным задачам. В [91–94] разработан метод решения некоторых типов некорректных и плохо обусловленных линейных задач (уравнения и задачи исключения) с неточно заданными исходными данными; использовались достаточно эффективные итерационные методы, дополненные эффективными критериями прекращения итерационного процесса; доказана сходимость так получаемых приближенных решений к точным при стремлении исходных погрешностей к нулю.

В [95] предложена и исследована модификация метода Крандалла–Кикута нахождения СЗ и СВ матрицы (или оператора в гильбертовом пространстве), не приводящая к решению

плохо обусловленных линейных уравнений. В [96] и цитированных там работах предложены и исследованы способы ускорения сходимости некоторых нелинейных итерационных процессов. В [97] исследован вопрос полноты СВ самосопряженной спектральной задачи с нелинейным вхождением СП.

**Разработка и расчеты линейных ускорителей и других электротехнических устройств.** Физические процессы в этих устройствах можно моделировать при определенном приближенном подходе краевыми задачами для систем нелинейных ОДУ большой размерности. В отделе был выполнен большой цикл работ [98–101 и др.], в которых разрабатывались численные методы решения таких задач, впервые изучались вопросы захвата частиц в режиме ускорения, их группировки, связи колебаний в различных плоскостях, зависимости решений от начальных данных, влияния взаимодействия частиц на их динамику и др. Получено авторское свидетельство [102]. Предложены методы расчета ячеистого волновода [103]. Эти результаты непосредственно использовались инженерами на практике.

**Разработка новых численных и аналитико-численных методов решения краевых задач для эллиптических уравнений и их применения.** В работе [104] для вычислительно трудной задачи Римана—Гильберта для аналитических функций обоснован конечно-разностный метод, который обеспечивает точность 1-го порядка по шагу сетки. На основе оператора разрешения этой задачи осуществлено приведение задачи Пуанкаре для обобщенных аналитических (по И.Н. Векуа) функций к интегральному уравнению и дан алгоритм приближенного решения последнего. Для численного решения задачи Пуанкаре использован и обоснован также вариационно-разностный метод (на базе метода наименьших квадратов); проведенные численные эксперименты подтвердили реальную эффективность метода (см. [105] и цитированную там статью в ЖВМ и МФ, 1969, № 2).

Предложены и разработаны принципиально новые, основанные на сочетании аналитического и численного подходов методы решения двумерных и трехмерных краевых задач для уравнения Пуассона и некоторых других уравнений второго порядка в сложных, а также сингулярно возмущенных областях [106–110 и др.]. Границы областей могут содержать геометрические особенности различных типов. В частности, область может иметь узкие щели, длинные растрескивания, скругленные углы, конуса или ребра при малых радиусах закругления и т.п. Созданные методы обладают рядом преимуществ по сравнению с ранее известными. Они адекватно отражают структуру решения вблизи особенностей границы и позволяют надежно и с высокой точностью находить как само решение, так и его градиент, в частности вблизи особенностей, что исключительно важно для приложений. Получены оценки погрешности решения и его градиента в норме максимума модуля, а также оценки скорости сходимости методов. Выполненные численные реализации показали высокую эффективность и очень высокую точность вычисления не только решения, но и его дифференциальных характеристик вплоть до сингулярных элементов границы. Даны приложения этих методов к решению практически важных прикладных задач: к расчету электрических полей в лазерах новой конструкции, содержащих электроды сложной формы, с оптимизацией формы последних [111], к расчету полей в технологических установках по производству синтетических волокон и в других современных физических приборах [112].

Разработан также метод решения краевых задач для уравнения Пуассона в плоских областях сложной конфигурации, основанных на сочетании ранее разработанного метода мультиполей с блочным подходом и многокомпонентной итерационной процедурой Шварца [113, 114]. Такое сочетание позволило значительно расширить сферу применимости метода мультиполей и, в частности, охватить расчет практически всех профилей стержней, используемых в машиностроении. Методы применены для расчета концентрации напряжений в высоконагруженных элементах конструкций.

Получено продвижение в развитии аналитических методов решения некоторых краевых задач в сложных областях. Построено обобщение метода Леви—Гарабедяна решения задачи Коши в областях сложной формы, дано приложение этого результата к расчету и оптимизации параметров электронной пушки [115]. Осуществлено развитие обобщенного аналитического метода Треффца для уравнения Пуассона на многоугольниках. На этой основе разработан алгоритм решения задачи кручения и изгиба стержней для широкого класса сечений, найден явный

вид асимптотик при подходе трещины к границе для важных механических величин (жесткости стержня и коэффициента интенсивности напряжений в кончике трещины) [116–117].

Отдел внес вклад в создание и развитие тематики, вылившейся в дальнейшем в широкое направление по разработке методов декомпозиции областей. Одной из первых работ этого направления явилась инициированная А.А. Дородницыным работа [118], в которой были найдены условия сходимости и получил обоснование итерационный метод с разделением основной области на подобласти без перекрытия решения краевых задач для уравнения Пуассона. В дальнейшем в [119] был предложен и обоснован новый быстросходящийся, допускающий полное распараллеливание итерационный метод декомпозиции решения краевых задач для сингулярных эллиптических с параметром диссипативных уравнений 2-го порядка. Метод был численно реализован на основе билинейных конечных элементов (КЭ), и проведенные эксперименты подтвердили его очень высокую скорость сходимости. Кроме того, получено также обоснование альтернирующего метода Шварца для произвольного числа подобластей [114].

**Работы по океанологии и численному моделированию гидрофизических процессов в водоемах.** По этой тематике в отделе было выполнено два больших цикла работ. В одном цикле работ [120–123 и др.], выполнявшемся совместно с сотрудниками института Океанологии АН СССР и МГУ, на уровне некоторых моделей изучалась устойчивость различных океанических течений, а также течений в прибрежных зонах. В рамках линейной теории возмущений задачи сводились к сложным спектральным задачам для систем линейных ОДУ, в том числе с особенностями. Для решения некоторых из таких задач наряду с приведенными выше общими методами применялись методы и приемы, предложенные в [124] и работе в ЖВМ и МФ, 1972, № 2.

В другом цикле работ [125–127 и др.] разрабатывались численные методы решения краевых задач для описывающих движение жидкости в приближении “мелкой воды” уравнений Сен-Венана, для рек и относительно неглубоких водоемов. В [125] была рассмотрена многокамерная модель течения воды в реках и обоснован предельный переход при неограниченном увеличении числа камер. В [126] был предложен простой способ осуществления регуляризации на участках границы, которые могут становиться характеристическими, позволивший обеспечить устойчивость расчетов. В [127] производилось численное моделирование длинных волн в рамках однослойной и двухслойной моделей. Методы использовались и отрабатывались при расчете циркуляции и уровня вод в конкретных водоемах: в Аральском и Черном морях, в Северном Каспии, в Финском заливе и Онежском озере, в прибрежных зонах и в реках. Разрабатывались также методы численного моделирования гидродинамики прибрежных зон с учетом динамики донных наносов [128], влияния изменчивости береговой линии, а также ветровых полей [129]. Эти исследования проводились в рамках научного сотрудничества с рядом гидрологических институтов.

Исследования, методы и расчеты работ этих циклов использовались специалистами в гидрологических приложениях, при разработке методов рационального использования природных ресурсов и охраны морей, при разработке береговых и берегозащитных сооружений в прибрежной зоне Черного моря у берегов Крыма, и др.

**Методы исследования и решения начально-краевых задач для нелинейных эволюционных УрЧП (в том числе с вырождениями и фазовыми переходами) и их применения.** Для некоторых типов систем нелинейных эволюционных УрЧП (класс систем включает уравнения параболического и гиперболического типов) для метода сеток и схемы Рунге исследована сходимость не только самих приближенных решений, но и их производных различных порядков; доказана неулучшаемость полученных оценок (см. [130] и цитированные там работы).

В большом цикле работ детально исследованы свойства метода сеток решения уравнений типа нестационарной фильтрации. Здесь возможны ситуации, когда решение является обобщенным, но не классическим. Разностные схемы, не учитывающие этого, могут дать качественно неверный результат. Для предложенных схем доказана сходимость приближенного решения к точному [131–136]. В [137] предложен эффективный метод решения систем УрЧП, описывающих фильтрацию многокомпонентных смесей. Метод основан на замене такой системы эквивалентной системой, представляющей собой совокупность уравнений параболического или гиперболического типов, для решения которой используются разностные схемы специального

вида. Методы применялись для решения конкретных прикладных задач, описывающих режим разработки нефтегазовых месторождений для многофазных смесей типа нефть-вода-газ и другие явления [138, 139].

В [140], [141] и других работах исследованы некоторые классы нелинейных операторных уравнений с разрывными монотонными операторами (в евклидовом и гильбертовом пространствах). Предложено определение решения таких уравнений, для некоторых типов этих уравнений доказаны существование и единственность решения, построен сходящийся итерационный метод решения, установлена скорость его сходимости в зависимости от свойств исходного оператора, предложен прием ускорения сходимости метода.

Важными прикладными задачами, решенными в отделе совместно с ФИАН СССР, являются задачи о распространении лазерного луча в нелинейных средах с многократной его самофокусировкой. Явление описывается нелинейным уравнением типа Шредингера. Существенным свойством задачи в простейшей модели, делающим ее очень сложной для численного решения, является наличие особых точек, при приближении к которым решение перестает быть ограниченным (точки самофокусировки луча). Предложенный в [142] численный метод и уточнение физической модели дали возможность продолжить решение после перехода через такие точки и провести численные исследования широкого круга задач. Результаты обширных вычислений хорошо согласовались с результатами экспериментов. Ограничимся указанием первых работ [143–145], которые явились частью цикла работ, зарегистрированного в Государственном реестре открытий СССР как научное открытие [146]. К этой тематике следует отнести также работу [147], в которой изучена разрешимость в целом смешанной КрЗ для нелинейного уравнения типа Шредингера.

**Разработка новых численных методов решения краевых задач для линеаризованных и нелинейных систем Навье–Стокса для несжимаемой жидкости.** Для предложенного А.А. Дородницыным (см. [148], работы [50, 53] в списке этих трудов) итерационного метода с расщеплением граничных условий (ГУ) решения 1-й краевой задачи в двумерном случае для стационарного уравнения Навье–Стокса (в переменных “функция тока-вихрь”) были найдены условия сходимости и получено теоретическое обоснование, причем сначала для бигармонического уравнения и системы Озеена, а затем и для нелинейного уравнения Навье–Стокса (см. [149] и цитированные там работы). Несмотря на невысокую (степенного, а не экспоненциального характера) скорость сходимости, метод применялся для расчета конкретных течений вязкой несжимаемой жидкости (см. [148] и работы [55, 60, 61], приведенные там).

Позже для разрешения (КЭ-) схемы Гриффитса, аппроксимирующей (скорости — биквадратными, а давление — кусочно-постоянными элементами) в целом 1-ю краевую задачу для системы типа Стокса с параметром на прямоугольнике были разработаны и численно исследованы алгоритмы многосеточного метода [150]. При этом существенным моментом явилось построение операции аппроксимативно соленоидальной интерполяции для перехода на более грубые сеточные уровни. Метод обладает высокой скоростью сходимости, однако сама КЭ-схема оказывается довольно громоздкой и вдобавок обеспечивает лишь 1-й порядок точности по шагу сетки для давления.

В дальнейшем под влиянием работы А.А. Дородницына ([148], статья [91] в списке трудов, первое сообщение сделано в 1985 г.), в которой был предложен новый итерационный метод с расщеплением ГУ для задачи пространственного обтекания тел вязкой несжимаемой жидкостью, в отделе были построены на дифференциальном уровне принципиально новые быстросходящиеся итерационные методы с неполным и полным расщеплением ГУ решения 1-й краевой задачи для упомянутой выше уже многомерной сингулярно возмущенной системы типа Стокса, возникающей при дискретизации по времени начально-краевых задач для нестационарных систем Стокса и Навье–Стокса (большой параметр  $\mu^2$  в системе типа Стокса при этом обратно пропорционален коэффициенту вязкости, умноженному на шаг по времени), см. [151] и первоначальную статью в ДАН, 1992, т. 325, № 5, цитированную там. Итерационные методы с неполным расщеплением ГУ были разработаны при взаимно полезных контактах с авторами статьи [152], в которой метод этого типа был предложен для сингулярно возмущенного уравнения типа бигармонического.

Для системы типа Стокса такие методы приводят на итерациях к существенно более простым, чем исходная, краевым задачам для уравнений Пуассона или Гельмгольца (диссипативного) и в процессе итераций выстраивают точные граничные значения для нормальной производной от давления одновременно с решением всей задачи. Для случая слоя при условии периодичности задачи по переменным вдоль слоя установлена сходимость методов в шкале пространств Соболева–Слободецкого с точной оценкой скоростей [153], получены так называемые “ $\varepsilon$ -коэрцитивные” ( $\varepsilon = 1/\mu$ ) оценки решений в этих пространствах исходной сингулярно возмущенной задачи. Обоснование этих методов для системы типа Стокса получено также и для областей с круговой симметрией [154]. Наиболее простые — первые из указанных итерационных процессов, обеспечивают уменьшение ошибки за 1 итерацию не менее, чем в 10 раз, а вторые — несколько более сложные — в число раз пропорциональное даже величине  $\mu^2$  в случае слоя между плоскостями и величине  $\mu$  в случае шарового слоя.

Кроме того, были построены аналогичные методы с (полным) расщеплением ГУ в областях с круговой симметрией см. [155, 156] и для системы Стокса. И в этом случае, когда уже нет большого сингулярного параметра, наличие которого оказалось благоприятным фактором для повышения скорости сходимости, удалось обеспечить достаточно высокую скорость сходимости процессов: например, для шарового слоя уменьшения ошибки за итерацию — не менее чем в 8,9 раза, а для “толстых” слоев — и значительно больше.

Разработке численных реализаций всех этих методов посвящен большой цикл работ группы сотрудников отдела. В [157] для случая полосы при условии периодичности и в [158] для случая шарового слоя при условии осевой симметрии были построены алгоритмы непосредственных билинейных КЭ-реализаций этих новых итерационных методов с расщеплением ГУ. Оказалось, что и скорости, и давление возможно аппроксимировать одинаково — билинейными КЭ (для случая шарового слоя в сферической системе координат), не заботясь при этом о выполнении каких-либо условий согласования аппроксимаций для скоростей и давления типа известного, трудно проверяемого условия устойчивости Ладыженской–Брецци–Бабушки (ЛББ-условия), необходимого при КЭ-аппроксимациях всей задачи в целом. Численными исследованиями обнаружено, что построенные КЭ-реализации обеспечивают в норме максимума модуля 2-й порядок точности и для скорости, и для давления во всей полосе — в случае полосы при условии периодичности, а в шаровом слое — вне малых конических окрестностей оси симметрии; вплоть же до оси симметрии порядок точности падает, для давления — даже до 1-го порядка.

Кроме того, у непосредственных билинейных КЭ-реализаций итерационных методов с расщеплением ГУ для системы типа Стокса обнаружилось еще одно весьма нежелательное явление — существенное падение скорости сходимости на средних и высоких гармониках (по сравнению с дифференциальными версиями методов). В случае слоя при условии периодичности этот значительный недостаток удалось радикальным образом преодолеть в [159, 160] с помощью несложных модификаций КЭ-аппроксимаций формул пересчета на границе. В результате в этом случае были разработаны численные реализации методов с расщеплением ГУ, имеющие следующие достоинства: 1) они оперируют в физических переменных “скорость–давление”; 2) обладают достаточной алгоритмической простотой; 3) имеют реально, при использовании многосеточного метода Р.П. Федоренко для разрешения этих КЭ-схем, высокие скорости сходимости; 4) обеспечивают в норме максимума модуля 2-й порядок точности численных решений. Такого порядка точности для давления не могут обеспечить многие из других известных методов, в частности КЭ-аппроксимации всей задачи в целом, удовлетворяющие ЛББ-условию.

Непосредственная, осуществленная в [158] КЭ-реализация итерационного метода с расщеплением ГУ для системы Стокса в шаровом слое на удивление не страдает падением скорости сходимости на высоких гармониках. На ее основе был построен новый итерационный метод расчета стационарных осесимметричных течений вязкой несжимаемой жидкости в шаровом слое [161]. С помощью этого метода был получен ряд высокоточных численных решений задачи о сферических течениях Куэтта при различных режимах вращения граничных сфер. Как показали сравнения с экспериментальными данными, метод сходится практически в области докритических значений числа Рейнольдса.

Построение модификаций КЭ-реализаций из [158] методов с расщеплением ГУ для систем Стокса и типа Стокса в осесимметричном случае, обеспечивающих 2-й порядок точности в



норме максимума модуля по всему шаровому слою и для скоростей, и для давления, удалось осуществить в [162] на основе результатов работы [163]. В итоге и в случае шаровых слоев при наличии осевой симметрии построены КЭ-реализации методов с расщеплением ГУ для систем Стокса и типа Стокса, обладающих теми же свойствами, что и перечисленные выше для случая слоя при условии периодичности.

Проводились также численные исследования методов решения начально-краевой задачи для нестационарной системы Стокса, заключающихся в дискретизации по времени задачи и численном решении возникающих на временных слоях краевых задач для системы типа Стокса с помощью методов с расщеплением ГУ. В [162] обнаружено следующее принципиально новое явление: шаги по времени нельзя брать очень малыми, так как это может приводить к чрезмерно большим ошибкам для давления при сохранении высокой точности для скорости. Условием, обеспечивающим достаточно высокую точность как для скорости, так и для давления, по-видимому, является сравнимость величин шагов по времени и по пространству. Такой метод интегрирования с дискретизацией по времени типа Кранка–Николсон численно исследовался в [164] именно при этом условии [164]; он обнаружил 2-й порядок точности по пространственным и временным шагам.

Для случая полосы при условии периодичности были разработаны также и бикубические КЭ-реализации всех итерационных процессов с расщеплением ГУ для систем Стокса [165]. При одинаковом аппроксимировании и скорости, и давления бикубическими КЭ методы обеспечивают 4-й порядок точности для сеточных значений как для скорости, так и для давления, однако лишь 3-й порядок точности численных решений в норме максимума модуля. Один результат работы [166] показал, что при построении бикубической КЭ-аппроксимации задачи Неймана (встречающейся на итерациях во всех фигурирующих процессах с расщеплением ГУ) вместо общепринятого по методу КЭ задания ГУ как естественного краевого условия следует использовать более жесткое задание граничного условия Неймана, что позволяет повысить порядок точности до 4-го.

Разрабатываемые численные методы с расщеплением ГУ для системы типа Стокса допускают хорошее перенесение на случаи более общих областей. Так, разработаны и в основном численно исследованы КЭ-реализации на основе билинейных элементов итерационных методов с расщеплением ГУ: в [167] — на прямоугольнике, а в [168] — в неконцентрических кольцах, причем алгоритмика последней статьи переносится на случай произвольной двусвязной области, для которой известно конформное отображение на концентрическое кольцо. И в этих случаях, для которых уже не имеется обоснования методов даже на дифференциальном уровне, получены результаты, аналогичные предыдущим.

С целью выделения для различных значений сингулярного параметра наиболее быстрых итеративных методов (из таких как многосеточный метод, метод верхней релаксации, метод переменных направлений) разрешения билинейных и бикубических КЭ-схем численного решения краевых задач для диссипативного уравнения Гельмгольца, встречающихся в методах с расщеплением ГУ для системы типа Стокса, проведено исследование [166].

**Численное исследование и применение кубатурных формул с теоретико-числовыми сетками к вычислению многократных интегралов.** Изложение теории таких формул, которые на некоторых классах функций имеют более высокий порядок точности, чем метод Монте-Карло, приведено в монографии [169]. В отделе при участии и консультациях автора монографии и под руководством Ф.Г. Черемисина осуществлялось применение этих формул к вычислению интеграла столкновения Больцмана и сравнение их по эффективности с методом Монте-Карло [170]. Результаты, полученные с использованием “рендомизированных сеток”, оказались существенно точнее, чем при использовании метода Монте-Карло. Кубатурные формулы с теоретико-числовыми сетками в настоящее время систематически используются в ВЦ РАН при решении кинетических уравнений; они находят применение для вычисления многомерных интегралов высокой кратности и в других научных институтах, например, в ОИЯИ (Дубна).

**Работы по теории колебаний оболочек. Исследования по колебаниям жидкости в сосудах.** Методом асимптотического интегрирования впервые проведено исследование спектров частот свободных колебаний тонких упругих оболочек вращения, дана классификация спект-

ров [171–173]. На этой основе получены простые и достаточно точные алгоритмы определения частот и форм различных типов свободных колебаний оболочек.

Получены важные результаты в области исследования колебаний жидкости в жестких и упругих сосудах [174–176]. Трехмерная задача о колебаниях жидкости в жестком сосуде произвольной формы при определенном механически разумном подходе сведена к двумерной. Установленные двусторонние оценки частот при этом подходе показывают высокую точность такого приближенного метода. Для задачи о колебаниях упругих систем с жидкостью дана новая оригинальная постановка, существенно упрощающая ее решение.

**Теория сетчатых оболочек и пластин.** Создана основополагающая теория многослойных сетчатых оболочек как континуальных систем, получившая широкое признание как в нашей стране, так и за рубежом [177, 178] и целый ряд предшествовавших и последующих работ. На основе созданной фундаментальной теории были разработаны эффективные методы решения широкого класса актуальных задач статики, устойчивости и динамики сетчатых и ребристых оболочек. Эти методы нашли широкое применение при проектировании многих ответственных сооружений. В результате оптимизации структуры сеток оболочек были проведены расчеты многих рациональных систем народнохозяйственного значения, обладающих высокими прочностными свойствами; в том числе на основе выполненных прочностных расчетов налажен серийный заводской выпуск сетчатых и зонтичных оболочек специального назначения особо больших размеров. С помощью предложенного численного метода проведены соответствующие расчеты и даны рекомендации по оптимизации установки зеркала самого крупного в мире (в то время) шестиметрового телескопа [179]. Проведены исследования, которые внесли существенный вклад в развитие физически и геометрически нелинейной теории оболочек [180].

**Разработка численных методов решения краевых задач, возникающих в теории оболочек. Метод декомпозиции.** Для упругих безмоментных оболочек положительной, отрицательной и меняющей знак гауссовой кривизны, при использовании уравнений в перемещениях, рассмотрены краевые задачи с достаточно общими граничными условиями четырех видов [181, 182]. Во всех случаях задачи сводятся к вариационным с положительно определенным функционалом (потенциальной энергии). Для численного решения рассмотренных задач использован вариационно-разностный метод (метод КЭ). Для оболочек с кривизной, меняющей знак, на линии смены знака задаются дополнительные условия сопряжения.

Для безмоментных сетчатых оболочек в [183] обоснованы численные методы и получены результаты, аналогичные результатам работ [181, 182]. Для различного типа задач для моментных сетчатых оболочек вращения в [184] обоснован приближенный метод решения, приводящий к соответствующей безмоментной задаче и нахождению поправок типа погранслоя; получены оценки погрешности метода.

Предложен (см. [185]) и развивался новый метод декомпозиции (по независимым переменным) численного решения краевых задач для уравнений с частными производными высокого порядка, в частности задач, встречающихся в механике твердого деформируемого тела и оболочек. Метод с успехом использовался для построения приближенных решений ряда вычислительно сложных задач с точностью вполне достаточной для инженерных расчетов [186–188]. В одном частном случае приближенного решения задач об изгибе сетчатых пластин различного типа (уравнение 4-го порядка) с общими граничными условиями в работе [189] получено теоретическое обоснование метода декомпозиции и дана оценка его точности. В общем же случае сходимость метода декомпозиции не получила пока математического обоснования.

**Вклад в разработку систем автоматизированного проектирования самолетов.** К числу весьма значимых работ отдела следует отнести исследования и разработки в области предварительного оптимального автоматизированного проектирования самолетов [190]. В частности, был разработан метод оптимизационного статического расчета силовой системы крыла самолета [191], которое представлялось тонкостенной оболочкой многозамкнутого профиля. При этом под оптимизационным понимался расчет, приводящий к крылу с такими сечениями, при которых конструкция окажется в определенном смысле равнопрочной.

**Решение задач линейной теории упругости для многослойных и непрерывно неоднородных сред.** Для решения задач теории упругости и термоупругости для слоистых сплошных и полых цилиндров разработан аналитический метод функций влияния [192 и соответствующие

ссылки там]. С помощью преобразований Фурье и Ганкеля построены аналитические решения первой основной краевой задачи теории упругости для полупространства, состоящего из произвольного конечного числа слоев различных материалов, при произвольных нормальных и касательных нагрузках на внешней поверхности полупространства в плоском, пространственном и осесимметричном случаях [193]. Путем предельного перехода в решении этой задачи при бесконечном увеличении числа слоев и стремлении их толщин к нулю в [194] получены также аналитические решения для непрерывно неоднородного пространства.

На основе предыдущих результатов разработаны методы решения плоских и осесимметричных смешанных задач теории упругости для многослойных и непрерывно неоднородных полупространств, а именно контактных задач с двухсторонними и односторонними связями при известных и неизвестных областях контакта [195–197] и задачи о трещинах в слоистых средах [198, 199]. Методы сводят задачи к сингулярным интегральным уравнениям, которые с помощью регуляризации приводятся к интегральным уравнениям типа Фредгольма; последние решаются численно.

Для упругих контактных задач с тонкими многослойными покрытиями в [200] разработан новый асимптотический метод, позволяющий получать сравнительно простые аналитические решения для любого числа слоев, в том числе и для случая очень тонких слоев, чего не удавалось осуществить ранее известными методами.

С применением интегральных преобразований Ганкеля и Лапласа–Карсона на основе теории Био получено аналитическое и численное решение осесимметричной задачи о консолидации многослойного, пористого, насыщенного водой полупространства при произвольной внешней нормальной нагрузке, а также о консолидации пористого упругого полупространства под давлением кругового штампа [201 и соответствующая ссылка там].

Результаты многих из этих работ нашли применение в практике конкретных инженерных расчетов напряженного и деформированного состояния различных слоистых структур в ряде отраслевых научно-исследовательских и проектных институтов.

**Работы по теории и численным методам решения задач линейной и нелинейной механики деформируемого твердого тела.** В отделе получены фундаментальные результаты по теории нестационарных задач для деформируемых твердых тел под воздействием интенсивных термомеханических нагрузок, при высоких скоростях нагружения, конечных упругопластических деформациях [202–204], с учетом разрушения материала [202, 205, 206]. Предложен аналитический метод решения одномерных динамических задач для упруговязкопластических материалов с неизвестной заранее границей раздела между упругой и вязкопластическими областями. В [207] метод применен к решению задачи об определении волны упругой разгрузки в упруговязкопластических стержнях. Исследованы закономерности распространения нелинейных волн в упругопластических и упруговязкопластических средах [207 и др.]. Исследованы закономерности распространения сильных и слабых разрывов в термоупруговязкопластических средах в связанной постановке задачи [203, 208].

Большой цикл работ [207–209 и др.], посвящен развитию асимптотического метода решения начально-краевых задач для сингулярно возмущенных систем квазилинейных уравнений гиперболического типа от двух переменных и приложению этого метода к решению задач о структуре ударных волн в структуре полос локализации при квазистатическом и динамическом нагружении. Разработаны численные методы решения жестких задач с несколькими масштабными факторами, разными по порядку величин [209, 203]; методы применены к решению задач о распространении упругопластических волн с малой вязкостью.

Разработаны численные методы первого и второго порядка точности решения пространственных задач теории упругости и пластичности методом пространственных характеристик [202, 210, 211] и дано их приложение к решению широкого класса двумерных задач о неупругом соударении [210, 205, 212]. В [213, 214] для статических задач линейной и нелинейной теории упругости, теории оболочек развиты модификации метода конечных элементов и метода сплайнов.

Проводились также практически важные работы в прикладных областях. Разработаны методы численного моделирования образования струй в кумулятивных снарядах, пробивания

многослойных преград при высоких и сверхвысоких скоростях удара, см. [212, 204, 206]; созданные пакеты прикладных программ нашли применение в ряде отраслевых НИИ и КБ.

Разработаны новые методы исследования и решения квазистатических контактных задач для упругих, вязкоупругих и упругопластических тел. Эти работы были инициированы актуальными технологическими проблемами в машиностроении и обработке металлов давлением. При этом значительное внимание уделялось изучению и учету трения, которое является едва ли не определяющим фактором и существенно влияет на разнообразные технологические процессы, качество получаемых изделий, надежность и ресурс технологического оборудования [215].

В целях исследования напряженно-деформированного состояния металла как при его нагрузке в некоторой части изделия, так и одновременно при его разгрузке в другой части в условиях больших деформаций нагружения, пространственного характера деформирования и сложного характера контактного взаимодействия с обрабатываемым инструментом разработан новый метод численного изучения технологических процессов — метод локальных функционалов. Этот метод является модификацией метода конечных элементов и позволяет использовать для получения приближенных решений возникающих задач современную теорию А.А. Ильюшина упругопластических процессов. С помощью разработанного метода были исследованы технологические процессы изготовления и эксплуатации прокладок автомобильных двигателей [216, 217].

Метод локальных функционалов применялся также для анализа несущей способности толстостенных упругопластических труб при их одновременной нагрузке внешним давлением и изгибом, возникающими при моделировании процесса прокладки трубопровода по дну моря [218, 219].

**Работы по геофизике.** Совместно с сотрудниками Института физики Земли АН СССР в большом цикле работ [220–223 и цитированные в них более ранние статьи] построена теория возмущений в задаче о собственных колебаниях Земли, которые фиксируются при очень мощных (катастрофических) землетрясениях. Эта теория может быть использована для уточнения существующих моделей внутреннего строения Земли. В частности, она была применена к изучению диссипативных свойств ее недр.

Проведены численные и аналитические исследования задач о деформировании и разрушении геологической среды под действующими вулканами. Разработаны новые представления о прорывах магмой питающих каналов, образовании даек и других пластовых интрузий. Новые представления созданы на основе комплекса данных о вулканах Карымском и Ключевском на Камчатке и вносят важный вклад в создание научно-обоснованных прогнозов извержений [224, 225].

Проведены исследования возможностей и эффективности использования моментных теорий механики сплошной среды при анализе состояний геомеханического континуума [226].

**Разработка аналитико-численных методов, основанных на применении специальных голоморфных разложений одной или нескольких комплексных переменных к решению ряда уравнений с частными производными и краевых задач.** Отправляясь от методики, использующей известное представление Колосова-Мухелишвили общего решения уравнений теории упругости в двумерном случае, проведено существенное расширение этого классического метода на случай трехмерных задач, а также разработана методика применения голоморфных функций для некоторых нелинейных задач.

Проведены разработки и исследования по применению теории функций нескольких комплексных переменных для построения аналитико-численных приближенных решений некоторых пространственных линейных задач теории упругости и других задач математической физики [227–229]. Предложен способ выделения некоторых линейных уравнений математической физики, у которых существуют решения, допускающие конечные специальные представления через голоморфные функции одного и нескольких переменных. В частности, с использованием теории функций двух комплексных переменных получены приближенные решения некоторых трехмерных краевых задач моментной теории упругости Коссера для цилиндрических тел с боковыми вырезами [230].

Для ряда двумерных нелинейных уравнений математической физики, таких как уравнения для плоских физически нелинейных задач теории упругости при малых деформациях, уравнения

плоских задач теории упругости в модели Синьорини при больших деформациях, система уравнений Навье–Стокса, уравнение  $\sin$ -Gordon, уравнение Кортевега–де-Фриза, разработан метод получения многообразий аналитико-численных частных решений, основанный на специальных представлениях решений исследуемой системы комплексифицированных уравнений [231, 232].

**Работы по теории разрешимости и качественной теории краевых задач для уравнений с частными производными, по теории некоторых функциональных пространств.** В работе [233] изучено поведение решений задачи Коши для  $2-p$  параболического,  $p \geq 1$ , уравнения с малым параметром  $\varepsilon$ , вырождающегося при  $\varepsilon = 0$  в уравнение с частными производными 1-го порядка, при начальных данных, разрывных на некоторой поверхности. Установлено важное представление решений в виде суммы трех слагаемых: решения невозмущенной задачи, разрывного на характеристической поверхности, функции типа внутреннего погранслоя и остаточного члена, равномерно стремящегося к нулю при  $\varepsilon \rightarrow 0$ .

Исследовано предельное поведение при больших временах решений задачи Коши–Пуассона о волнах в водоеме постоянной глубины, поддерживаемых периодическим по времени поверхностным давлением [234]. Установлено существование предельной амплитуды, получены некоторые другие результаты качественного характера о поведении решений, а также некоторые их оценки.

Для эллиптических с параметром диссипативных уравнений 2-го порядка с дивергентной главной частью в областях с липшицевой границей в [235] описана теория смешанных краевых задач (типа Зарембы) с неоднородными граничными условиями в рамках обобщенных решений из пространства Соболева  $W_2^1$ . Изучены порождаемые такими задачами операторы типа Пуанкаре–Стеклова. При определенных условиях при минимальной гладкости граничных функций проведено обоснование метода Фурье. Полученные результаты существенно использовались в [119] при обосновании метода декомпозиции области.

Построена теория весовых пространств типа Харди гармонических функций и аналогичных пространств аналитических функций в области со спрямляемой границей [236]. При этом получены аналоги ряда основных результатов классических пространств Харди, относящиеся к граничным свойствам, приближению многочленами, установлены оценки решений краевых задач и др. Эти результаты были применены для обоснования развиваемых аналитико-численных методов решения краевых задач.

Получены новые результаты по асимптотическому поведению при больших временах решений 1-й краевой задачи для квазилинейных параболических уравнений [237], а также линеаризованных систем уравнений Навье–Стокса с нерегулярными коэффициентами [238]. Использование методов теории предельного перехода в уравнениях со слабо сходящимися (в частности, осциллирующими) коэффициентами позволило доказать асимптотическую близость решений к решению предельной стационарной задачи.

**Построение аналога метода Винера–Хопфа для уравнений с операторами свертки на конечном интервале. Работы по спектральной теории таких интегральных операторов.** Для одного класса уравнений свертки на конечном интервале с символами, имеющими невырожденную степенную асимптотику на бесконечности в [239] получен достаточно конструктивный аналог метода Винера–Хопфа, сводящий уравнение в образах Фурье–Лапласа к векторной (с двумя компонентами) задаче Гильберта линейного сопряжения на некотором контуре в комплексной плоскости, проходящем через  $\infty$ . Этот класс включает в себя ряд уравнений, встречающихся в математической физике и других областях. В [240] разработан метод построения канонической матрицы решений возникающей задачи Гильберта.

С помощью результатов работы [239] в [241] получено обобщение метода Винера–Хопфа уже для произвольных уравнений свертки на конечном интервале с символами, имеющими невырожденную степенную асимптотику на бесконечности. В этом обобщении метода уравнение приводится в образах Фурье к неклассической задаче сопряжения на действительной оси, для которой построена необходимая теория. Установлена нетеровская разрешимость рассмотренных уравнений в шкале пространств Соболева–Слободецкого обобщенных функций на интервале.

Проведено обстоятельное изучение спектральных свойств интегральных операторов свертки на конечном интервале с ядрами, образы Фурье которых (символы) являются рациональными

функциями [242, а также цитированная там статья в ДАН СССР, Т. 194, № 4]. Выделены случаи “слабо” несамосопряженных регулярных ядер, для которых обеспечивается “правильность” асимптотики для собственных значений (СЗ), и “существенно” несамосопряженных ядер, спектр которых имеет патологический характер. В первом случае получена асимптотика собственных функций (СФ) и установлена их базисность по Риссу.

Впервые получены асимптотические разложения для СЗ и СФ интегральных операторов свертки на конечном интервале с общими невырожденными однородными полярными ядрами [243, а также цитированная там первоначальная работа автора в ДАН СССР, 1974, т. 218, № 1]. Получены принципиально новые результаты, обнаружены новые неожиданные эффекты у спектральных асимптотик таких уже по существу псевдодифференциальных операторов. Методы, разработанные в последней из указанных работ, послужили началом создания теории решения уравнений свертки на конечном интервале, представленной в работах [239–241]. Эти методы допускают развитие и позволяют получать спектральные асимптотики и для более сложных операторов свертки.

**Развитие теории векторной задачи Гильберта линейного сопряжения.** В связи с запросами, появившимися в ходе выполнения работ по разрешимости уравнений свертки на конечном интервале, в [244] была построена достаточно законченная теория векторной задачи Гильберта линейного сопряжения (этой чрезвычайно важной задачи и для ряда других приложений) с кусочно-непрерывным невырожденным матричным коэффициентом на произвольной кусочно-гладкой кривой с самопересечениями (сети). Установлено существование канонической матрицы решений однородной задачи с элементами, представимыми интегралами типа Коши с плотностями из  $L_p$ -пространств с весами, удовлетворяющими условию Макенхаупта, и получены соответствующие необходимые оценки решений неоднородной задачи в таких пространствах. Построение такой теории даже с непрерывной матрицей на гладком контуре долгое время оставалось проблемой. В [244] оно осуществлено при использовании развитого в работах Б.В. Хведелидзе метода интегралов типа Коши, а также принципа локализации для этой задачи. Кроме того, в [245] были найдены условия минимального характера, обеспечивающие непрерывность вплоть до контура и степенное поведение в окрестностях узловых точек решений однородной векторной задачи линейного сопряжения.

### Литература

1. *Абрамов А.А.* Вариант метода прогонки // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1961. Т.1, № 2. С. 349–351.
2. *Абрамов А.А.* О переносе граничных условий для систем линейных обыкновенных дифференциальных уравнений (вариант метода прогонки) // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1961. Т. 1, № 3. С. 542–545.
3. *Курочкин С.В.* О свойствах устойчивости методов дифференциальной прогонки // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 2000. Т.40, № 11. С. 1611–1614.
4. *Абрамов А.А., Андреев В.Б.* О применении метода прогонки к нахождению периодических решений дифференциальных и разностных уравнений // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1963. Т. 3, № 2. С. 377–381.
5. *Abramov A.A., Birger E.S., Konyukhova N.B., Ulyanova V.I.* On methods of numerical solution of boundary-value problems for systems of linear ordinary differential equations // Colloquia Math. Soc. János Bolyai, 22 (Keszthely, Hungary). Numer. Methods. Amsterdam–Oxford–New York: North-Holland Publ. Co., 1977. P. 33–67.
6. *Абрамов А.А., Диткин В.В., Конюхова Н.Б., Парийский Б.С., Ульянова В.И.* Вычисление собственных значений и собственных функций обыкновенных дифференциальных уравнений с особенностями // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1980. Т. 20, № 5. С. 1155–1173.
7. *Абрамов А.А., Бураго Н.Г., Диткин В.В., Дышко А.Л., Заболоцкая А.Ф., Конюхова Н.Б., Парийский Б.С., Ульянова В.И., Чечель И.И.* Пакет прикладных программ для решения линейных двухточечных краевых задач // М.: ВЦ АН СССР, 1982. 63 с.
8. *Джангирова С.А.* О многоточечных задачах для систем линейных обыкновенных дифференциальных уравнений // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1987. Т. 27, № 9. С. 1375–1380.
9. *Абрамов А.А., Альварес Л.М.* Метод решения жестких краевых задач, основанный на расщеплении оператора // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1989. Т. 29, № 12. С. 1800–1810.
10. *Абрамов А.А., Альварес Л.М., Гонсалес-Фелипе Р., Родригес А.Р.* О некоторых возможностях метода расщепления оператора // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1991. Т. 31, № 7. С. 953–961.

11. *Абрамов А.А.* О переносе условия ограниченности для некоторых систем обыкновенных линейных дифференциальных уравнений // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1961. Т. 1, № 4. С. 733–737.
12. *Биргер Е.С., Ляликowa (Конюхова) Н.Б.* О нахождении для некоторых систем обыкновенных дифференциальных уравнений решений с заданным условием на бесконечности // Ж. вычисл. матем. и матем. физ.: I. 1965. Т. 5, № 6. С. 979–990; II. 1966. Т. 6, № 3. С. 446–453.
13. *Абрамов А.А.* О граничных условиях в особой точке для систем линейных обыкновенных дифференциальных уравнений // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1971. Т. 11, № 1. С. 275–278.
14. *Абрамов А.А.* О поведении граничных условий, переносимых в окрестности регулярной особой точки // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1980. Т. 20, № 4. С. 901–908.
15. *Абрамов А.А.* О численном решении некоторых алгебраических задач, возникающих в теории устойчивости // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1984. Т. 24, № 3. С. 339–348.
16. *Конюхова Н.Б.* О допустимых граничных условиях в иррегулярной особой точке для систем линейных обыкновенных дифференциальных уравнений // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1983. Т. 23, № 4. С. 806–824.
17. *Конюхова Н.Б., Пак Т. В.* К переносу допустимых граничных условий из бесконечности для систем линейных обыкновенных дифференциальных уравнений с большим параметром // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1987. Т. 27, № 6. С. 847–866.
18. *Абрамов А.А., Балла К., Конюхова Н.Б.* Перенос граничных условий из особых точек для систем обыкновенных дифференциальных уравнений // М.: ВЦ АН СССР, 1981. 64 с.
19. *Абрамов А.А., Конюхова Н.Б., Балла К.* Устойчивые начальные многообразия и сингулярные краевые задачи для систем обыкновенных дифференциальных уравнений // Comput. Math. Banach Center Publ. Warsaw: PWN – Polish Scient. Publishers, 1984. V. 13. P. 319–351.
20. *Abramov A.A., Konjukhova N.B.* Transfer of admissible boundary conditions from a singular point for systems of linear ordinary differential equations // Sov. J. Numer. Anal. Math. Modelling. Utrecht: VNU Science Press, 1986. V. 1, № 4. P. 245–265.
21. *Курочкин С. В.* Дискретность спектра линейной двухточечной краевой задачи с условиями ограниченности решения в особых точках // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1992. Т. 32, № 1. С. 1999–2004.
22. *Абрамов А.А., Балла К.* О приближенных решениях, основанных на теоремах сравнения, скалярных и матричных уравнений Риккати на бесконечном интервале // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1993. Т. 33, № 1. С. 35–52.
23. *Курочкин С. В.* О сингулярных краевых задачах для линейных гамильтоновых систем // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1994. Т. 34, № 1. С. 58–67.
24. *Абрамов А.А., Асланян А.А., Балла К.* Сравнение решений прогоночных уравнений при переносе граничных условий из бесконечности для гамильтоновых линейных систем // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1995. Т. 35, № 12. С. 1808–1818.
25. *Конюхова Н.Б.* Сингулярные задачи Коши для систем обыкновенных дифференциальных уравнений // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1983. Т. 23, № 3. С. 629–645.
26. *Староверова И.Б.* О корректности и оценках решений сингулярных задач Коши для систем нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1994. Т. 34, № 8/9. С. 1150–1167.
27. *Конюхова Н.Б.* Сингулярные задачи Коши для некоторых систем нелинейных функционально-дифференциальных уравнений // Дифференц. уравнения. 1995. Т. 31, № 8. С. 1340–1347.
28. *Нгуен Там.* О применении метода прямых к областям неправильной формы // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1968. Т. 8, № 2. С. 334–343.
29. *Ханкишиев З.Ф.* О сходимости метода прямых при решении уравнений эллиптического типа с вырождением // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1978. Т. 18, № 1. С. 126–138.
30. *Абрамов А.А., Ульянова В.И., Юхно Л.Ф.* О выделении решений, ограниченных в особой точке, для некоторых дифференциально-алгебраических систем уравнений // Дифференц. уравнения. 2004. Т. 40, № 7. С. 893–897.
31. *Насибов Ш.М.* О численном выделении ограниченных решений систем линейных дифференциальных уравнений в частных производных эволюционного типа // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1977. Т. 17, № 1. С. 119–135.
32. *Конюхова Н.Б.* О выделении устойчивых многообразий для некоторых нелинейных систем обыкновенных дифференциальных уравнений с особенностью // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1973. Т. 13, № 3. С. 609–626.
33. *Балла К.* К решению сингулярных краевых задач для некоторых нелинейных систем обыкновенных дифференциальных уравнений // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1980. Т. 20, № 4. С. 909–922.
34. *Конюхова Н.Б.* О существовании и единственности ограниченных решений систем эволюционных квазилинейных уравнений с частными производными первого порядка // Дифференц. уравнения. 1992. Т. 28, № 3. С. 469–482.

35. *Конюхова Н.Б.* О предельном поведении ограниченного решения системы эволюционных квазилинейных уравнений с частными производными первого порядка при неограниченном возрастании времени // Дифференц. уравнения. 1992. Т. 28, № 9. С. 1561–1573.
36. *Конюхова Н.Б.* О стационарной задаче Ляпунова для системы квазилинейных уравнений с частными производными первого порядка // Дифференц. уравнения. 1994. Т. 30, № 8. С. 1384–1395.
37. *Конюхова Н.Б.* Гладкие многообразия Ляпунова и сингулярные краевые задачи // М.: ВЦ РАН, 1996. 41 с.
38. *Konyukhova N.B., Sukov A.I.* Smooth Lyapunov manifolds and correct mathematical simulation of nonlinear singular problems in mathematical physics // In: *Mathematical Modeling. Problems, Methods, Applications* / Ed. by L.A.Uvarova, A.V.Latyshev. New York–Boston–Dordrecht–London–Moscow: Kluwer Academic / Plenum Publishers, 2001. P. 205–217.
39. *Конюхова Н.Б.* О существовании устойчивых начальных многообразий для систем нелинейных функционально-дифференциальных уравнений // ДАН СССР. Математика. 1989. Т. 306, № 3. С. 535–540.
40. *Киторогаз Д.И., Конюхова Н.Б., Парийский Б.С.* Метод тригонометрических матриц решения систем гиперрадиальных уравнений Шредингера (в задачах квантовой физики на связанные состояния частиц) // М.: ВЦ АН СССР, 1989. 67 с.
41. *Абрамов А.А.* Об отыскании собственных значений и собственных функций самосопряженной дифференциальной задачи // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1991. Т. 31, № 6. С. 819–831.
42. *Асланян А.А.* О решении самосопряженной задачи на собственные значения при больших значениях спектрального параметра // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1995. Т. 35, № 11. С. 1653–1655.
43. *Абрамов А.А.* О вычислении собственных значений нелинейной спектральной задачи для гамильтоновых систем обыкновенных дифференциальных уравнений // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 2001. Т. 41, № 1. С. 29–38.
44. *Абрамов А.А., Юхно Л.Ф.* Нелинейная спектральная задача для уравнения типа Штурма-Лиувилля со связанными граничными условиями, зависящими от спектрального параметра // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1999. Т. 39, № 7. С. 1119–1133.
45. *Абрамов А.А., Балла К., Ульянова В.И., Юхно Л.Ф.* Нелинейная самосопряженная спектральная задача для дифференциально-алгебраических уравнений // Дифференц. уравнения. 2003. Т. 39, № 7. С. 867–878.
46. *Биргер Е.С., Конюхова Н.Б.* Численный расчет распространения радиоволн в вертикально-неоднородной тропосфере // Радиотехника и электроника. 1969. Т. XIV, № 7. С. 1147–1156.
47. *Курочкин С.В.* Топологические методы локализации собственных значений краевых задач // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1995. Т. 35, № 8. С. 1165–1174.
48. *Абрамов А.А., Ульянова В.И., Юхно Л.Ф.* Метод решения нелинейной несамосопряженной спектральной задачи для некоторых систем линейных обыкновенных дифференциальных уравнений // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 2004. Т. 44, № 1. С. 104–110.
49. *Абрамов А.А., Дышко А.Л., Конюхова Н.Б., Пак Т.В., Парийский Б.С.* Вычисление вытянутых сфероидальных функций решением соответствующих дифференциальных уравнений // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1984. Т. 24, № 1. С. 3–18.
50. *Абрамов А.А., Дышко А.Л., Конюхова Н.Б., Левитина Т.В.* Вычисление радиальных волновых функций для сфероидов и трехосных эллипсоидов модифицированным методом фазовых функций // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1991. Т. 31, № 2. С. 212–234.
51. *Конюхова Н.Б., Масалович С.Е., Староверова И.Б.* О вычислении быстроосциллирующих собственных функций непрерывного спектра и несобственных интегралов от них // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1995. Т. 35, № 3. С. 360–379.
52. *Конюхова Н.Б., Староверова И.Б.* Модификация фазового метода решения сингулярных самосопряженных задач Штурма-Лиувилля // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1997. Т. 37, № 10. С. 1183–1200.
53. *Конюхова Н.Б., Линь В.Х., Староверова И.Б.* О модификациях фазового метода в сингулярных задачах квантовой физики // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1999. Т. 39, № 3. С. 492–522.
54. *Биргер Е.С.* Об устойчивом вычислении некоторых функционалов от собственных функций задачи Штурма-Лиувилля на бесконечном интервале // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1968. Т. 8, № 5. С. 1126–1133.
55. *Абрамов А.А., Дышко А.Л., Конюхова Н.Б., Левитина Т.В.* Вычисление угловых волновых функций Ламе решением вспомогательных дифференциальных уравнений // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1989. Т. 29, № 6. С. 813–830.
56. *Левитина Т.В.* О численном решении некоторых трехпараметрических спектральных задач // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1999. Т. 39, № 11. С. 1787–1801.
57. *Абрамов А.А., Ульянова В.И.* О решении уравнений для определения уровней энергии ионизированной молекулы водорода // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1961. Т. 1, № 2. С. 351–354.



58. *Абрамов А.А., Ульянова В.И.* О вычислении уровней энергии системы: два ядра – один электрон // Теор. и эксперим. хим. 1970. Т. 6, № 3. С. 384–386.
59. *Абрамов А.А.* Метод решения некоторых многопараметрических задач на собственные значения, возникающих при использовании метода Фурье // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1994. Т. 34, № 10. С. 1524–1527.
60. *Абрамов А.А., Ульянова В.И.* Один метод решения самосопряженных многопараметрических спектральных задач для систем уравнений с особенностями // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1998. Т. 38, № 10. С. 1636–1640.
61. *Абрамов А.А., Ульянова В.И., Южно Л.Ф.* Метод решения многопараметрической спектральной задачи для некоторых систем дифференциальных уравнений // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 2000. Т. 40, № 1. С. 21–29.
62. *Абрамов А.А., Вайнштейн Л.А., Дышко А.Л., Конюхова Н.Б.* Численные исследования свободных электрических осесимметричных колебаний идеально проводящего вытянутого сфероида // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1989. Т. 29, № 4. С. 535–553.
63. *Конюхова Н.Б., Фот Т.Е.* Численные исследования свободных электрических осесимметричных колебаний идеально проводящего сплюснутого сфероида // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1995. Т. 35, № 8. С. 1209–1232.
64. *Коган Ш.М., Таскинбоев Р.* Спектры мелких доноров в германии и кремнии // Физика и техника полупроводников. 1983. Т. 17, № 9. С. 1583–1587.
65. *Бадалян А.М., Белова Т.И., Конюхова Н.Б., Эфрос В.Д.* Резонансы в системе  $^4\text{H}$  // Ядерная физика. 1985. Т. 41, № 6. С. 1460–1469.
66. *Бадалян А.М., Конюхова Н.Б., Парийский Б.С.* Спектр состояний в квантовой механике Янга–Миллса // Ядерная физика. 1987. Т. 45. Вып. 6. С. 1768–1779.
67. *Биргер Е.С., Вайнштейн Л.А., Конюхова Н.Б.* Дифракция волнового пучка на плазменном цилиндре // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1976. Т. 16, № 6. С. 1526–1538.
68. *Абрамов А.А., Конюхова Н.Б., Левитина Т.В.* О задаче дифракции плоской звуковой волны на трехосном эллипсоиде // Дифференц. уравнения. 1993. Т. 29, № 8. С. 1347–1357.
69. *Абрамов А.А., Дышко А.Л., Конюхова Н.Б., Левитина Т.В.* О численно-аналитическом исследовании задач дифракции плоской звуковой волны на идеальных вытянутых сфероидах и трехосных эллипсоидах // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1995. Т. 35, № 9. С. 1374–1400.
70. *Levitina T.V., Brändas E.J.* Computational techniques for prolate spheroidal wave functions in signal processing // J. Comp. Meth. Sci. and Engrg. (JCMSE; Cambridge Intern. Science Publishing). 2001. V.1, № 2S–3S. P. 287–313.
71. *Абрамов А.А., Конюхова Н.Б., Парийский Б.С., Приходько В.Ю., Тюткин В.В.* Численные исследования свободных и вынужденных колебаний в сжимаемой среде замкнутых упругих моментных оболочек вращения // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1989. Т. 29, № 5. С. 747–764.
72. *Абрамов А.А., Конюхова Н.Б., Курочкин С.В., Парийский Б.С., Приходько В.Ю.* Численные исследования осесимметричных свободных колебаний в вакууме и возбуждения в сжимаемой среде вытянутой цилиндрической оболочки с полусферическими торцами // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1993. Т. 33, № 10. С. 1550–1580.
73. *Levitina T., Brändas E.J.* Scattering by a potential separable in ellipsoidal coordinates // Int. J. Quant. Chem. 1997. V. 65. P. 601–608.
74. *Белова Т.И., Воронов Н.А., Конюхова Н.Б., Парийский Б.С.* Численные исследования устойчивости частицеподобных решений уравнений скалярного поля // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1981. Т. 21, № 1. С. 89–106.
75. *Гани В.А., Конюхова Н.Б., Курочкин С.В., Ленский В.А.* Исследование устойчивости заряженного топологического солитона в системе двух взаимодействующих скалярных полей // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 2004. Т. 44, № 11. С. 2069–2083.
76. *Дышко А.Л., Карпентьер М., Конюхова Н.Б., Лима П.* О сингулярных задачах для нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка типа Эмдена–Фаулера // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 2001. Т. 41, № 4. С. 595–619.
77. *Белова Т.И., Воронов Н.А., Кобзарев И.Ю., Конюхова Н.Б.* Частицеподобные решения скалярного уравнения Хиггса // Ж. эксперим. и теоретич. физ. 1977. Т. 73. Вып. 5(11). С. 1611–1622.
78. *Воронов Н.А., Дышко А.Л., Конюхова Н.Б., Староверова И.Б.* О нелинейных сингулярных задачах в релятивистской космологии. I — Поле Хиггса в пространствах Минковского и Фридмана // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1997. Т. 37, № 11. С. 1345–1361; II — Поле Хиггса в пространстве де Ситтера // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1997. Т. 37, № 12. С. 1506–1519.
79. *Дышко А.Л., Конюхова Н.Б.* Множественные одномерные и сферически симметричные автомодельные решения нелинейного волнового уравнения поля Хиггса в пространстве де Ситтера // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 2001. Т. 41, № 3. С. 467–488.

80. Дышко А.Л., Конюхова Н.Б. Множественные автомодельные решения типа струн и монополей систем нелинейных волновых уравнений в инфляционной космологии // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 2002. Т. 42, № 4. С. 471–490.
81. Копыткова Н.В., Дышко А.Л., Воронцов Н.А. On singular problems for self-similar solutions to the systems of nonlinear wave equations arising in the inflationary cosmology // Матем. журн. Алматы, 2004. Т. 4, № 1(11). С. 84–94.
82. Abramov A., Neuhaus M. Bemerkungen über Eigenwertprobleme von Matrizen höherer Ordnung // Math. Ingr. C. r. Congr. Intern. Mons et Bruxelles, 1958. P. 176–179.
83. Ши Чжун-цы. Замечание о вычислении старшего собственного значения по методу Галеркина // Вычисл. матем. М.: АН СССР, 1960. № 6. С. 84–86.
84. Абрамов А.А. О выделении главной части некоторых алгебраических задач // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1962. Т. 2, № 1. С. 141–145.
85. Шишов В.С. Применение группового исключения неизвестных в задаче об отыскании собственных значений и собственных функций линейного интегрального оператора с симметрическим ядром // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1962. Т. 2, № 3. С. 398–410.
86. Абрамов А.А., Юхно Л.Ф. Об одном методе отыскания наименьшего собственного значения нелинейной самосопряженной спектральной задачи // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1998. Т. 38, № 7. С. 1095–1105.
87. Абрамов А.А., Белаш В.О. Об одном методе исключения для линейных задач // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1995. Т. 35, № 4. С. 499–510.
88. Абрамов А.А. О сходимости одного метода исключения // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1998. Т. 38, № 3. С. 355–364.
89. Абрамов А.А., Юхно Л.Ф. Один метод исключения для линейных задач // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1998. Т. 38, № 4. С. 547–556.
90. Абрамов А.А., Белаш В.О., Юхно Л.Ф. Модификация некоторых методов исключения // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 2000. Т. 40, № 7. С. 974–979.
91. Абрамов А.А. Об одном методе решения плохо обусловленных систем линейных алгебраических уравнений // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1991. Т. 31, № 4. С. 483–491.
92. Абрамов А.А. О свойствах метода Крейга при решении линейных некорректных задач // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1995. Т. 35, № 1. С. 144–150.
93. Абрамов А.А., Ульянова В.И., Юхно Л.Ф. О применении метода Крейга к решению линейных уравнений с неточно заданными исходными данными // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 2002. Т. 42, № 12. С. 1763–1770.
94. Абрамов А.А., Ульянова В.И., Юхно Л.Ф. О реализации одного метода исключения в линейных задачах с неточно заданными исходными данными // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 2004. Т. 44, № 4. С. 640–649.
95. Диткин В.В. Модифицированный метод Крандалла-Кикута // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1976. Т. 16, № 4. С. 838–846.
96. Заболоцкая А.Ф. Ускорение сходимости метода скорейшего спуска в гильбертовом пространстве // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1974. Т. 14, № 1. С. 218–221.
97. Абрамов А.А., Юхно Л.Ф. О полноте совокупности собственных векторов нелинейной самосопряженной спектральной задачи // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 2000. Т. 40, № 4. С. 503–504.
98. Ломнев С. П. Методы расчета линейных электронных ускорителей М.: ВЦ АН СССР, 1962. 203 с.
99. Ломнев С. П. Решение задачи о движении частиц разных знаков и масс в поле “магнитных бутылок” на ЭВМ // ДАН СССР. 1963. Т. 151, № 2. С. 315–317.
100. Ломнев С. П. Вариант магнитной ловушки // ДАН СССР. 1964. Т. 158, № 4. С. 827–830.
101. Ломнев С. П. Эволюционный метод решения задач электродинамики // ДАН СССР. 1964. Т. 159, № 6. С. 1249–1251.
102. Ломнев С. П., Переславцев Э.Б., Шатунов В.М. Способ удержания и накопления в ловушке высокотемпературной плазмы. Авторское свидетельство № 167260. 1964.
103. Ломнев С. П., Краснушкин П.Е. Методы расчета ячеистого волновода // Радиотехника и электроника. 1966. Т. 11, № 6. С. 1051–1065.
104. Клабукова Л.С. Приближенный метод решения задач Гильберта и Пуанкаре // Вычислит. матем. М.: Изд-во АН СССР. I. 1958, № 3. С. 34–87. II. 1961, № 7. С. 115–132.
105. Клабукова Л.С., Чечель И.И. Решение краевых задач теории обобщенных аналитических функций вариационно-разностным методом // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1984. Т. 24, № 1. С. 19–36.
106. Власов В.И., Пальцев А.Б. Метод решения задачи Дирихле для областей с узкой щелью // Докл. РАН. 1993. Т. 330, № 2. С. 140–143.
107. Власов В.И., Рачков А.В. Метод решения уравнения Пуассона в областях с криволинейной границей // М.: ВЦ РАН, 1994. 59 с.
108. Власов В.И., Рачков А.В. Некоторые обобщения метода мультиполей // М.: ВЦ РАН, 1994. 40 с.

109. *Власов В.И., Рачков А.В.* Аналитико-численный метод решения уравнения Пуассона в сложных областях // Докл. РАН 1995. Т. 344, № 3. С. 301–304.
110. *Власов В.И., Волков Д.Б.* Метод мультиполей для решения уравнения Пуассона в областях со скругленным углом // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1995. Т. 35, № 6. С. 867–892.
111. *Paltsev A.B., Vlasov V.I., Volkov D.B.* Modification of Multipole method and Its Application to Analysis of Lasers. In the book: "Integral Methods in Science and Engineering", Harlow: Longman Scientific. Technical, 1994. P. 51–60.
112. *Власов В.И., Волков Д.Б.* Исследование электрического поля в технологической установке для производства полимерных волокон. М.: ВЦ РАН, 1995. 38 с.
113. *Власов В.И., Рачков А.В.* Аналитико-численный метод решения краевых задач для уравнения Пуассона в сложных областях // Тр. междунар. конф. "Современные проблемы математики и механики", посвященной 175-летию со дня рождения П.Л. Чебышева. I. М.: МГУ, 1996. С. 83–87.
114. *Рачков А.В.* О сходимости метода Шварца для произвольного числа подобластей // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1995. Т. 35, № 2. С. 260–270.
115. *Власов В.И., Волков Д.Б., Скороходов С.Л.* Оптимизация параметров электронной пушки. М.: ВЦ РАН, 1994. 23 с.
116. *Власов В.И., Скороходов С.Л.* О развитии метода Треффца // Докл. РАН. 1994. Т. 337, № 6. С. 713–717.
117. *Skorokhodov S.L., Vlasov V.I.* An exact method for torsion and bending problems for beams with polygonal cross-sections // Integral methods in science and engineering (Pitman research notes in mathematics). 1997. V. 2. John Wiley & Sons. New York. P. 174–178.
118. *Матеева Э.И., Пальцев Б.В.* О разделении областей при решении краевых задач для уравнения Пуассона в областях сложной формы // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1973. Т. 13, № 6. С. 1441–1458.
119. *Меллер Н.А., Пальцев Б.В., Чечель И.И.* О быстросходящемся итерационном методе с разделением на подобласти решения краевых задач для эллиптического с параметром уравнения второго порядка // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1996. Т. 36, № 10. С. 26–45.
120. *Абрамов А.А., Тареев Б.А., Ульянова В.И.* Неустойчивость двухслойного геострофического течения с антисимметричным профилем скорости в верхнем слое // Изв. АН СССР. ФАО. 1972. Т. VIII, № 10. С. 1017–1028.
121. *Иванов Ю.А., Ульянова В.И.* Устойчивость волн Россби // Изв. АН СССР. ФАО. 1978. Т. 14, № 3. С. 251–256.
122. *Блатов А.С., Ульянова В.И.* Исследование гидродинамической устойчивости крупномасштабных течений в океане в рамках многоуровневой квазигеострофической модели // Изв. АН СССР. ФАО. 1986. Т. 22, № 11. С. 1161–1168.
123. *Абрамов А.А., Мишинов А.Е., Ульянова В.И.* Неустойчивость вдольбереговых течений в прибойной зоне // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1996. Т. 36, № 10. С. 103–110.
124. *Ульянова В.И.* О переносе неоднородных граничных условий и о вычислении собственных функций // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1976. Т. 16, № 4. С. 1057–1059.
125. *Баклановская В.Ф., Чечель И.И.* Численный метод решения уравнений Сен-Венана (камерная модель) // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1976. Т. 16, № 5. С. 1218–1232.
126. *Баклановская В.Ф., Пальцев Б.В., Чечель И.И.* О краевых задачах для системы уравнений Сен-Венана на плоскости // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1979. Т. 19, № 3. С. 708–725.
127. *Баклановская В.Ф., Блатов А.С., Даулетияров К.Ж., Джумагазиева С.Х., Кондрин А.Т., Чечель И.И.* О численном моделировании длинных поверхностных волн в замкнутом медленно вращающемся бассейне // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1984. Т. 24, № 7. С. 1066–1078.
128. *Баклановская В.Ф., Мишинов А.Е., Чечель И.И.* Численное моделирование гидродинамики морской прибрежной зоны с учетом литодинамических процессов. // Моделирование гидрофизических процессов и полей в замкнутых водоемах и морях. М.: Наука, 1989. С. 117–131.
129. *Баклановская В.Ф., Блатов А.С., Перминов С.М., Чечель И.И.* Численное моделирование влияния изменчивости поля ветра, конфигурации береговой линии и стока Волги на циркуляцию вод Северного Каспия // Структура и динамика вод. М.: Наука, 1990. С. 31–38.
130. *Южно Л.Ф.* О характере сходимости метода сеток при решении нелинейных эволюционных уравнений // ДАН СССР. 1976. Т. 228, № 2. С. 325–328.
131. *Баклановская В.Ф.* Численное решение одномерной задачи для уравнений типа нестационарной фильтрации // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1961. Т. 1, № 3. С. 461–469.
132. *Гаипова А.Н.* Об однородной неявной разностной схеме для решения эволюционных уравнений с фазовыми изменениями // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1968. Т. 8, № 3. С. 534–543.
133. *Абрамов А.А., Гаипова А.Н.* О численном решении некоторых систем для задач типа Стефана // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1971. Т. 11, № 1. С. 121–128.
134. *Баклановская В.Ф.* Исследование метода сеток для параболических уравнений с вырождением // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1977. Т. 17, № 6. С. 1458–1473.

135. Тихомирова Е.И. О сходимости схемы Рунге для нелинейного эволюционного уравнения // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1983. Т. 23, № 6. С. 1370–1380.
136. Джумагазиева С.Х. Исследование свойств решений некоторых нелинейных уравнений // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1986. Т. 26, № 10. С. 1482–1492.
137. Южно Л.Ф. О численном решении системы дифференциальных уравнений теории фильтрации // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1975. Т. 15, № 4. С. 977–984.
138. Южно Л.Ф. Нестационарная фильтрация с учетом гравитации // Инж.-физ. журн. 1976. Т. XXXI, № 2. С. 355–362.
139. Баклановская В.Ф., Гаипова А.Н. Об одной осесимметричной задаче неустановившейся фильтрации газа в пористой среде // Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа. 1966. Т. 4. С. 162–164.
140. Абрамов А.А., Гаипова А.Н. О некоторых уравнениях, содержащих монотонные разрывные операторы // ДАН СССР. 1973. Т. 212, № 3. С. 529–531.
141. Абрамов А.А., Джумагазиева С.Х. О скорости сходимости одного итерационного метода решения уравнений, содержащих монотонные операторы // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1984. Т. 24, № 2. С. 305–308.
142. Дышко А.Л. Разностный метод решения уравнения распространения светового луча в нелинейной среде // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1968. Т. 8, № 1. С. 238–242.
143. Дышко А.Л., Луговой В.Н., Прохоров А.М. Самофокусировка интенсивных световых пучков // Письма в ЖЭТФ. 1967. Т. 6, № 5. С. 655–659.
144. Дышко А.Л., Луговой В.Н., Прохоров А.М. Многофокусная структура светового пучка в нелинейной среде // Ж. эксперим. и теоретич. физ. 1971. Т. 61. Вып. 6(12). С. 2305–2318.
145. Дышко А.Л., Луговой В.Н., Прохоров А.М. О многофокусной структуре световых пучков в нелинейной среде // Ж. эксперим. и теоретич. физ. 1973. Т. 65. Вып. 4(10). С. 1367–1374.
146. Дышко А.Л., Коробкин В.В., Луговой В.Н., Прохоров А.М. Явление многофокусности волнового пучка в нелинейной среде // Открытие № 147 с приоритетом от 19/VI-1967 (зарегистрировано в Государственном реестре открытий СССР 23 июля 1974 г.).
147. Насибов Ш.М. Об одном нелинейном уравнении типа Шредингера // Дифференц. уравнения. 1980. Т. 16, № 4. С. 660–670.
148. Дородницын А.А. Избранные научные труды в 2-х т. М.: ВЦ РАН, 1997. Т. 1. (содержит список основных научных трудов А.А. Дородницына); 395 с. Т. 2. 351 с.
149. Пальцев Б.В. О сходимости метода последовательных приближений с расщеплением граничных условий при решении краевой задачи для уравнений Навье-Стокса // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1970. Т. 10, № 3. С. 785–788.
150. Пальцев Б.В., Чечель И.И. Многосеточный метод разрешения одной конечноэлементной схемы для двумерной системы типа Стокса // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1990. Т. 30, № 12. С. 1797–1804.
151. Пальцев Б.В. О быстро сходящихся итерационных методах с (I) неполным (II) полным расщеплением граничных условий для многомерной сингулярно возмущенной системы типа Стокса // Матем. сб. 1994. Т. 185. I. № 4. С. 101–150; II. № 9. С. 109–138.
152. Абрамов А.А., Ульянова В.И. Об одном методе решения уравнений типа бигармонического с сингулярно входящим малым параметром // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1992. Т. 32, № 4. С. 567–575.
153. Пальцев Б.В., Чечель И.И. О точных оценках скорости сходимости итерационных процессов с расщеплением граничных условий для системы типа Стокса в слое с условием периодичности // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 2000. Т. 40, № 12. С. 1823–1837.
154. Пальцев Б.В. О методах с расщеплением граничных условий для системы типа Стокса в областях с круговой симметрией // Функциональные пространства. Дифференц. операторы. Проблемы матем. образования. Тр. междунар. конф., посвященной 75-летию чл.-корр. РАН, проф. Л.Д. Кудрявцева. М.: Изд-во РУДН, 1998. Т. 2. С. 124–128.
155. Пальцев Б.В. Об условиях сходимости итерационных методов с полным расщеплением граничных условий для системы Стокса в шаре и шаровом слое // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1995. Т. 35, № 6. С. 935–963.
156. Пальцев Б.В. Оптимизация значений релаксационных параметров одношагового варианта итерационного метода с расщеплением граничных условий для системы Стокса в шаровом слое // Вестник РУДН. 2001. Т. 8. Вып. 2. С. 74–90.
157. Пальцев Б.В., Чечель И.И. Алгоритмы численных реализаций на основе билинейных конечных элементов итерационных методов с расщеплением граничных условий для системы типа Стокса в полосе при условии периодичности // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1997. Т. 37, № 7. С. 799–815.
158. Меллер Н.А., Пальцев Б.В., Хлюпина Е.Г. О конечно-элементных реализациях итерационных методов с расщеплением граничных условий для систем Стокса и типа Стокса в шаровом слое. Осесимметричный случай // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1999. Т. 39, № 1. С. 98–123.

159. Пальцев Б.В., Чечель И.И. О некоторых способах повышения скорости сходимости на высоких гармониках билинейных конечно-элементных реализаций итерационных методов с расщеплением граничных условий для системы типа Стокса // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1998. Т. 38, № 6. С. 956–970.
160. Лозинский А.С. Об ускорении конечно-элементных реализаций итерационных процессов с расщеплением граничных условий для системы типа Стокса в слое с условием периодичности // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 2000. Т. 40, № 9. С. 1339–1363.
161. Меллер Н.А., Пальцев Б.В., Хлюпина Е.Г. О численном методе с расщеплением граничных условий для стационарной системы Навье–Стокса в шаровом слое в случае осевой симметрии // Междунар. конф. “Differential Equations and Related Topics”, посвященная 100-летию со дня рождения И.Г. Петровского. Тез. докл. М.: Изд-во МГУ, 2001. С. 311–313.
162. Пальцев Б.В., Чечель И.И. Конечно-элементные реализации итерационных методов с расщеплением граничных условий для систем Стокса и типа Стокса в шаровом слое, обеспечивающие 2-й порядок точности вплоть до оси симметрии // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 2005. Т. 45, № 5. С. 846–889.
163. Пальцев Б.В., Чечель И.И. О конечно-элементных, типа линейных, 2-го порядка точности вплоть до полюсов, аппроксимациях операторов Лапласа–Бельтрами, градиента и дивергенции на сфере в  $\mathbb{R}^3$  в осесимметричном случае // Докл. РАН. 2004. Т. 395, № 3. С. 308–315.
164. Chechel' I.I., Pal'tsev B.V. On numerical method for a nonsteady Stokes system on the basis of the Grank-Nicolson scheme and methods with splitting of boundary conditions // Тезисы докладов Второй международной конференции “Modern Trends in Computational Phisics”. 2000. JINR, Дубна, Россия. С. 49.
165. Белаши В.О., Пальцев Б.В. О бикубических конечно-элементных реализациях методов с расщеплением граничных условий для системы типа Стокса в полосе при условии периодичности // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 2002. Т. 42, № 2. С. 197–221.
166. Belash V.O., Pal'tsev B.V., Chechel' I.I. On convergence rate of some iterative methods for bilinear and bicubic finite element schemes for the dissipative Helmholtz equation with large values of a singular parameter // Russ. J. Numer. Anal. Modelling. 2002. Т. 17, № 6. P. 485–520.
167. Пальцев Б.В., Чечель И.И. О билинейных конечно-элементных реализациях итерационных методов с неполным расщеплением граничных условий для системы типа Стокса на прямоугольнике // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1999. Т. 39, № 11. С. 1838–1864.
168. Лозинский А.С. Конечно-элементная реализация итерационных методов с расщеплением граничных условий для системы типа Стокса в неконцентрических кольцах // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 2001. Т. 41, № 8. С. 1203–1216.
169. Коробов Н.М. Тригонометрические суммы и их приложения М.: Наука, 1989.
170. Меллер Н.А., Черемисин Ф.Г. Испытание различных стратегий метода Монте-Карло при решении уравнения Больцмана // Тр. III Всесоюзной конференции по актуальным проблемам вычислительной математики. Новосибирск, 1990. С. 111–113.
171. Пшеничников Г.И. Малые свободные колебания упругих оболочек вращения // Инж. журн. 1965. Т. 5. Вып. 4. С. 685–690.
172. Пшеничников Г.И. Свободные и вынужденные колебания тонкой упругой цилиндрической оболочки открытого профиля М.: ВЦ АН СССР, 1967. 100 с.
173. Пшеничников Г.И. Свободные осесимметричные колебания тонких упругих оболочек вращения // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1969. Т. 9, № 5. С. 1202–1207.
174. Пшеничников Г.И. Применение асимптотического метода интегрирования в задаче о свободных колебаниях тонкой упругой оболочки вращения, частично заполненной жидкостью. // Тр. VII Всесоюзн. конф. по теории пластин и оболочек. М.: Наука. 1970. 5 с.
175. Пшеничников Г.И. Свободные колебания жидкости в твердых сосудах // Прикл. матем. и механ. 1971. Т. 35. Вып. 4. С. 248–254.
176. Пшеничников Г.И. Точные решения некоторых задач о колебаниях жидкости в упругих безмоментных оболочках // Прикл. матем. и механ. 1972. Т. 36. Вып. 2. С. 739–743.
177. Пшеничников Г.И. Теория тонких упругих сетчатых оболочек и пластинок М.: Наука, 1982. 352 С.
178. Пшеничников Г.И. A theory of latticed plates and shells // Series on Advances in Mathematics for Applied Scientific. Singapore, New Tersey, London, Hong Kong. 309 p.
179. Пшеничников Г.И., Кукуджанов В.Н., Любимов В.М. Расчет деформируемых состояний отражающей поверхности зеркал телескопов // Численные методы в механике твердого деформируемого тела. М.: ВЦ АН СССР, 1978. С. 66–72.
180. Пшеничников Г.И., Орлов Б.А. Осесимметричное физически нелинейное деформирование сетчатых оболочек // Строительная механика и расчет сооружений. 1989, № 3. 0.2 печ. л.
181. Клабукова Л.С. О дифференциальном операторе задач теории безмоментных упругих оболочек и о решении их вариационно-разностным методом // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1980. Т. 20, № 1. С. 208–225.

182. *Клабукова Л.С.* О корректности краевых задач теории безмоментных упругих оболочек, кривизна которых может обращаться в нуль // *Ж. вычисл. матем. и матем. физ.* 1989. Т. 29, № 5. С. 732–746.
183. *Клабукова Л.С.* О корректности краевых задач и приближенном решении их для безмоментных сетчатых оболочек // *Ж. вычисл. матем. и матем. физ.* 1995. Т. 35, № 11. С. 1717–1726.
184. *Клабукова Л.С., Пшеничников Г.И.* Решение краевых задач моментных сетчатых оболочек вращения как безмоментных с поправками типа погранслоя // *Ж. вычисл. матем. и матем. физ.* 1969. Т. 35, № 12. С. 1855–1871.
185. *Пшеничников Г.И.* Метод декомпозиции решений уравнений и краевых задач // *ДАН СССР.* 1985. Т. 282, № 4. С. 792–794.
186. *Пшеничников Г.И.* Решение некоторых задач строительной механики методом декомпозиции // *Строительная механика и расчет сооружений.* 1986, № 4. 0.6 печ. л.
187. *Пшеничников Г.И., Скориков А.В.* Свободные колебания ортотропной прямоугольной пластины с упругим контуром // *Изв. РАН. МТТ.* 1992, № 2. С. 166–169.
188. *Абрамов А.А., Пшеничников Г.И., Ульянова В.И.* Поперечный изгиб растянутой прямоугольной пластины // *Изв. РАН. МТТ.* 1993, № 5. С. 160–165.
189. *Клабукова Л.С., Пшеничников Г.И., Ульянова В.И.* Решение методом декомпозиции краевых задач об изгибе сетчатой прямоугольной пластинки // *Ж. вычисл. матем. и матем. физ.* 1998. Т. 38, № 3. С. 433–447.
190. *Пшеничников Г.И., Кашин Г.М., Флеров Ю.А.* Метод автоматизированного проектирования самолета М.: Машиностроение, 1979. 165 С.
191. *Пшеничников Г.И., Кукуджанов В.Н., Любимов В.М., Пантелеев С.Д., Пичкова М.В.* Оптимизационный статический расчет крыла самолета // *Численные методы в механике твердого деформируемого тела.* М.: ВЦ АН СССР, 1978. С. 122–129.
192. *Nikishin V.C.* Thermal Stresses in a Composite Cylinder with an Arbitrary Temperature Distribution Along Its Length. Plenum Press Data Division. New York. 1966. 119 p.
193. *Никишин В.С., Шапиро Г.С.* Задачи теории упругости для многослойных сред М.: Наука, 1973. 132 с.
194. *Никишин В.С.* Задачи теории упругости для неоднородных сред. М.: ВЦ АН СССР, 1976. Вып. 4. 60 с.
195. *Никишин В.С., Шапиро Г.С.* Задачи о неполном контакте кольцевого или кругового штампа с упругой слоистой средой // *Изв. АН СССР. МТТ.* 1976, № 5. С. 27–38.
196. *Никишин В.С., Заболоцкая А.Ф., Парийский Б.С.* Аналитическое и численное исследование контактных задач теории упругости для слоистых сред с односторонними связями // *Проблемы прикладной математики и информатики.* М.: Наука, 1987. С. 145–169.
197. *Никишин В.С., Киторога Т. В.* Плоские контактные задачи теории упругости с односторонними связями для многослойных сред. // М.: ВЦ АН СССР, 1994. 43 с.
198. *Никишин В.С., Шапиро Г.С.* О локальном осесимметричном сжатии упругого слоя, ослабленного кольцевой или круговой щелью // *Прикл. матем. и механ.* 1974. Т. 38. Вып. 1. С. 139–144.
199. *Никишин В.С.* Осесимметричные контактные задачи для двухслойного упругого полупространства с кольцевой или круговой трещиной на границе раздела слоев // *Прикл. матем. и механ.* 2002. Т. 66. Вып. 4. С. 670–680.
200. *Ефимов А.Б., Смирнов В.Г.* Асимптотическое точное решение плоской контактной задачи для тонкого многослойного покрытия // *Изв. РАН МТТ.* 1996, № 2. С. 101–122.
201. *Никишин В.С., Парийский Б.С., Шапиро Г. С.* Задача о консолидации упругой пористой многослойной среды под давлением кругового в плане штампа // *Прикл. матем. и механ.* 1976. Т. 40. Вып. 5. С. 909–918.
202. *Кукуджанов В.Н., Кондауров В.И.* Численное решение неоднородных задач динамики твердого деформируемого тела // *Проблемы динамики упругопластических сред.* М.: Изд-во Мир, 1975. С. 45–90.
203. *Kukudzhanov V.N.* On wave propagation in a coupled thermoelastoplastic medium // *Arch. of Mech.* 1977. V. 29, № 2. P. 325–338.
204. *Кукуджанов В.Н.* Численное моделирование динамических процессов деформирования и разрушения упругопластических сред // М.: *Успехи механики.* 1985. Вып. 8, № 4. С. 21–65.
205. *Kukudzhanov V.N., Kondaurov V.I.* On constitutive equations and numerical solution of multidimensional problems of dynamics of nonisothermal elastoplastic media with finite deformations // *Arch. of Mech.* V. 31, № 5. 1979. P. 623–647.
206. *Кузьмина В.И., Кукуджанов В.Н.* К моделированию откольного разрушения при соударении пластин // *Изв. АН СССР МТТ.* 1985, № 3. С. 94–100.
207. *Кукуджанов В.Н.* Распространение упругопластических волн в стержнях с учетом влияния скорости деформации (монография). М.: ВЦ АН СССР, 1967.

208. *Kukudzhanov V.N.* The investigation of shock waves structure in elastoviscoplastic bars using the asymptotic method // Arch. of Mech. V. 33. N. 5. 1981. P. 739–751.
209. *Кукуджанов В.Н.* Одномерные задачи распространения волн напряжений в стержнях. М.: ВЦ АН СССР, 1977. Вып. 7. 56 с.
210. *Кукуджанов В.Н.* Численное решение не одномерных задач распространения волн напряжений в твердых телах. М.: ВЦ АН СССР, 1976. Вып. 6. 67 с.
211. *Веденяпин Е.Н., Кукуджанов В.Н.* Метод численного интегрирования задач распространения волн в упругих средах // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1981. Т. 21, № 5. С. 1233–1248.
212. *Заппаров К.И., Кукуджанов В.Н.* Решение нестационарных задач динамики упругопластической среды методом подвижных сеток // Численные методы в МДТТ. М.: ВЦ АН СССР, 1984. С. 64–85.
213. *Бураго Н.Г., Кукуджанов В.Н.* Численный метод решения геометрически нелинейных задач для упругопластических оболочек вращения // Строительная механика и расчет сооружений, 1976, № 5. С. 44–49.
214. *Кукуджанов В.Н., Любимов В.М., Мышев В.Д.* Метод определения нижних оценок предельной нагрузки // В сб. по численным методам в МДТТ. М.: ВЦ АН СССР, 1984. С. 139–150.
215. *Ефимов А.Б., Романюк С.Н., Чумаченко Е.Н.* Об определении закономерностей трения в процессах обработки металлов давлением // Изв. РАН МТТ. 1995, № 6. С. 82–95.
216. *Александрович А.И., Корноухов А.К., Попиелас Ф.* Математическое моделирование процесса осесимметричной штамповки кольцевой пластины с тонким резиноподобным покрытием // Изв. РАН. Пробл. машиностр. и надежности машин. 1998. № 4. С. 61–68.
217. *Александрович А.И., Корноухов А.К., Попиелас Ф., Вайс А.* Решение осесимметричных упругопластических задач деформирования тонкостенных изделий методом локальных функционалов (на немец. яз.). М.: ВЦ РАН, 1999. 39 с.
218. *Ефимов А.Б., Александрович А.И., Корноухов А.К.* Закрытое поведение и несущая способность толстостенных упругопластических труб при внешнем давлении и изгибе. // Математическое моделирование. 2002. Т. 14, № 9. С. 59–65.
219. *Александрович А.И., Кувшинов П.А.* Решение трехмерной упругопластической задачи для конечного отрезка толстостенной трубы методом локальных функционалов // Изв. РАН. МТТ. 2004, № 4. С. 76–85.
220. *Акопян С.Ц., Жарков В.Н., Любимов В.М.* Теория возмущений для крутильных колебаний Земли. Второе приближение // ДАН. СССР. 1972. Т. 204, № 3. С. 596–599.
221. *Акопян С.Ц., Жарков В.Н., Любимов В.М.* Теория возмущений для радиальных колебаний Земли. Второе приближение // ДАН. СССР. 1973. Т. 210, № 3. С. 584–587.
222. *Акопян С.Ц., Жарков В.Н., Любимов В.М.* Теория возмущений для сфероидальных колебаний Земли. Второе приближение // ДАН. СССР. 1972. Т. 218, № 5. С. 1078–1081.
223. *Жарков В.Н., Дорофеева Л.Н., Дорофеев В.М., Любимов В.М.* Пробные распределения диссипативной функции  $Q^{-1}$  в оболочке Земли // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1974, № 12. 0.6 печ. л.
224. *Ефимов А.Б., Ершова Т.Я., Федотов С.А.* О прорывах магмы питающего канала и образовании даек и других пластовых интрузий под Ключевским вулканом // Вулканология и сейсмология. 1996, № 1. С. 3–23.
225. *Ефимов А.Б., Ершова Т.Я.* О термомеханическом режиме системы, окружающей магматический канал // Вулканология и сейсмология. 1998. № 4–5. С. 88–102.
226. *Александрович А.И., Иванов А.И.* О напряженном состоянии геомеханической среды в откосах и склонах // Геология, инженерная геология, гидрогеология, геоэкология. 2003. № 1. С. 87–97.
227. *Александрович А.И., Кувшинов П.А., Титоренко Д.Ф.* Решение уравнений трехмерной теории упругости методами комплексного анализа // М.: ВЦ РАН, 1998. 22 С.
228. *Александрович А.И., Кувшинов П.А., Титоренко Д.Ф.* Решение уравнений трехмерной теории упругости методом голоморфного разложения комплексных перемещений по степенным функциям и функциям Бесселя // Изв. РАН. МТТ. 2001. Т. 2. С. 31–41.
229. *Александрович А.И., Кувшинов П.А., Титоренко Д.Ф.* Построение приближенных решений краевых задач теории упругости методом конечных аналитических элементов // Математическое моделирование. 2001. Т. 13, № 4. С. 109–116.
230. *Александрович А.И., Титоренко Д.Ф.* Голоморфные разложения решений некоторых линейных дифференциальных уравнений математической физики в применении к теории упругости // М.: ВЦ РАН, 2001. 56 с.
231. *Александрович А.И., Воробьев И.А., Жовноватюк В.Г., Соловьев М.Б.* Построение решений уравнений Навье–Стокса, Кортевега–де Фриза и синус–Гордон. М.: ВЦ РАН, 2004. 22 с.
232. *Александрович А.И., Горлова А.В., Демидова А.А., Титоренко Д.Ф.* Решение некоторых нелинейных задач теории упругости в комплексных переменных. М.: ВЦ РАН, 2004. 22 с.
233. *Исакова Е.К.* Асимптотическое разложение решения параболического уравнения с малым параметром // Матем. сб. 1966. Т. 69, № 2. С. 300–320.

234. *Исакова Е.К.* Принцип предельной амплитуды для задачи Коши–Пуассона // Дифференц. уравнения. 1970. I. Т. 6, № 1. С. 56-71; II. Т. 6, № 4. С. 721-730; III. Т. 6, № 7. С. 1289-1297.
235. *Пальцев Б.В.* О смешанной задаче с неоднородными граничными условиями для эллиптических с параметром уравнений второго порядка в липшицевых областях // Матем. сб. 1996. Т. 187, № 4. С. 59-116.
236. *Власов В.И., Рачков А.В.* О весовых пространствах типа Харди // Докл. РАН. 1993. Т. 328, № 3. С. 281-284.
237. *Камынин В.Л.* Асимптотическое поведение решений квазилинейных параболических уравнений в ограниченной области // Сибирский матем. журнал. 1994. Т. 35, № 2. С. 310-358.
238. *Камынин В.Л.* Асимптотическое поведение решений линеаризованных систем Навье-Стокса // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1997. Т. 37, № 8. С. 958-967.
239. *Пальцев Б.В.* Уравнения свертки на конечном интервале для одного класса символов, имеющих степенную асимптотику на бесконечности // Изв. АН СССР. Сер. матем. 1980. Т. 44, № 2. С. 322-393.
240. *Пальцев Б.В.* Об одном методе построения канонической матрицы решений задачи Гильберта, возникающей при решении уравнений свертки на конечном интервале // Изв. АН СССР. Сер. матем. 1981. Т. 45, № 6. С. 1332-1390.
241. *Пальцев Б.В.* Обобщение метода Винера-Хопфа для уравнений свертки на конечном интервале с символами, имеющими степенную асимптотику на бесконечности // Матем. сб. 1980. Т. 113, № 3. С. 355-399.
242. *Пальцев Б.В.* Разложение по собственным функциям интегральных операторов свертки на конечном интервале с ядрами, преобразования Фурье которых рациональны. “Слабо” несамосопряженные регулярные ядра // Изв. АН СССР. Сер. матем. 1972. Т. 36, № 3. С. 591-634.
243. *Пальцев Б.В.* Асимптотика спектра интегральных операторов свертки на конечном интервале с однородными полярными ядрами // Изв. АН СССР. Сер. матем. 2003. Т. 67, № 4. С. 67-155.
244. *Пальцев Б.В.* О канонической матрице решений задачи линейного сопряжения с кусочно-непрерывным матричным коэффициентом на элементарной кусочно-гладкой кривой // Докл. АН СССР. 1987. Т. 297, № 5. С. 1054-1058.
245. *Пальцев Б.В.* Об условиях, обеспечивающих непрерывность вплоть до контура и степенное поведение в окрестностях узловых точек решений однородной задачи линейного сопряжения с кусочно-непрерывным матричным коэффициентом // Докл. АН СССР. 1988. Т. 299, № 3. С. 558-562.



**ОТДЕЛ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ.  
РАЗРАБОТКА ВЫСОКОТОЧНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ  
ТЕХНОЛОГИЙ В ОТДЕЛЕ**

*А.И. Толстых*

---

**1. Введение**

Научные исследования, проводимые в отделе прикладной математической физики, ориентированы на создание и применение при решении актуальных задач, описываемых уравнениями в частных производных, численных методов, отличающихся от стандартных повышенной эффективностью. Эти методы включают в себя высокоточные дискретные модели, передовые технологии построения сеток, квазиизометрических отображений и поверхностей, а также эффективные итерационные алгоритмы решения алгебраических систем, возникающих, в частности, при дискретизации исходных уравнений.

Одним из основных направлений деятельности отдела является разработка и применение методов высокой точности (в том числе и принципиально новых) для численного решения задач механики сплошной среды. Важнейшим классом таких задач являются задачи, описываемые уравнениями Эйлера и Навье–Стокса. К этому же классу можно отнести различные вытекающие из них математические модели. Другим классом являются задачи механики твердого деформируемого тела.

Применение методов высокой точности во многих случаях обладает следующими преимуществами.

1. Заданная точность (например, точность инженерных приложений) может быть реализована с использованием сравнительно грубых сеток (по сравнению с сетками в случае схем невысокого порядка). Это означает помимо существенной экономии памяти компьютера еще более существенное сокращение времени счета. Например, уменьшение числа узлов в 2 раза в каждом из пространственных направлений обычно приводит в случае пространственных стационарных задач аэрогидродинамики к уменьшению времени счета приблизительно в 16 раз. Таким образом, здесь речь может идти об эффективных “решателях” для инженерных задач.

2. Методы высокой точности и высокой разрешающей способности незаменимы в случаях, когда нужно описать тонкие детали решений (например, при прямом численном моделировании турбулентности или больших вихрей), точно воспроизводить волновые процессы (например, в акустических задачах) и т. д.

Создание новых вычислительных технологий в отделе тесно связано с их применением при решении конкретных задач. Примерами являются численное моделирование различных океанических процессов, описание полей течений и получение аэродинамических характеристик в задачах аэрогидродинамики, моделирование технологического процесса формообразования в условиях ползучести материала. В настоящее время начаты исследования в области численного моделирования акустических полей и снижения уровней шума.

Ниже приводится краткое описание теоретических разработок и их реализаций (последний раздел написан В.А. Гаранжой). В списке литературы приведена лишь часть основных публикаций по этим направлениям.

**2. Методы высокого порядка, основанные на компактных аппроксимациях**

1. Первое из указанных выше преимуществ стимулировало в 70-х гг. прошлого столетия разработку совершенно нового для тех лет типа разностных схем третьего порядка, основанных на простейших так называемых компактных аппроксимациях (КА) [1]. Основную идею КА можно проиллюстрировать на примере первых производных. Обычную формулу численного диффе-

ренцирования на сетке  $x_j = jh$ ,  $h = \text{const}$  можно представить в виде  $(u_x)_j = u'_j \approx \sum_{k=-m}^n a_k u_{j+k}$ ,

где  $a_k$  суть некоторые коэффициенты, обнуляющие члены первого и более высоких порядков в разложениях Тейлора для функции  $u(x)$ . Применение таких формул с большим количеством коэффициентов (большим трех) часто приводит к нежелательным последствиям в виде неустойчивости основанных на них схем, трудностям формулировок граничных условий и т. д. Аппроксимацию первых производных можно записать и в виде

$$\sum_{k=-m}^{n-1} b_k u'_{j+k} = \sum_{k=-m}^n a_k u_{j+k} \quad \text{или} \quad u'_j = P^{-1} Q u_j, \quad (1)$$

где коэффициенты  $b_k$  подбираются так, чтобы обнулить большее количество членов в ошибке аппроксимации и тем самым увеличить ее порядок, а операторы  $P$  и  $Q$  являются операторами суммирования. Под компактными аппроксимациями обычно понимаются формулы такого типа с небольшим числом слагаемых в левой части (обычно с тремя слагаемыми), что позволяет реализовать трехточечные прогонки. Преимущество компактных аппроксимаций над обычными состоит не только в достижении большего порядка точности, но и в меньших коэффициентах в погрешностях, что делает КА очень точными.

В [1] и последующих работах автора были впервые построены КА третьего порядка для разностных схем в случае уравнений гидродинамического типа. Они учитывали направления распространения возмущений, так что основанные на них разностные схемы можно отнести к категории “противопотоковых” схем, обладающих большим запасом устойчивости. Сами же формулы КА такого типа можно назвать нецентрированными компактными аппроксимациями (НКА), поскольку их коэффициенты оказываются несимметричными относительно узла  $x = x_j$ .

Применение компактных схем третьего порядка позволило получать достаточно точные для инженерных приложений решения уравнений Навье-Стокса при использовании машин раннего поколения типа БЭСМ-6. Полученные результаты использовались в специальных методиках для оценок аэродинамических характеристик в аэрокосмических задачах.

Широкое применение такие схемы нашли в пакете прикладных программ, разработанных в отделе в рамках исследования процессов, происходящих в океанической среде. В пакет вошли также уникальные программные комплексы для численного моделирования внутренних волн, турбулентных образований и спектров поверхностного волнения.

2. В 80-х г. прошлого столетия были продолжены исследования в области компактных аппроксимаций. Были предложены, исследованы и использованы при решении конкретных задач новые их семейства и основанные на них схемы третьего и пятого порядков. Разработанная теория нашла отражения в двух монографиях [2, 3]. Компактные схемы пятого порядка оказались особенно удачными с точки зрения их высокой точности и хорошего запаса устойчивости. В общем виде их можно представить в форме (1) с той лишь разницей, что оператор  $Q$  сам имеет вид (1), и поэтому для вычисления производных требуется не одна, а две прогонки.

Отличительной особенностью всех предложенных КА является присутствие в них параметра (назовем его  $s$ ), определяющего свойство положительности или отрицательности оператора  $L(s) = P^{-1}(s)Q(s)$  компактного численного дифференцирования  $u'_j = L(s)u_j + O(h^m)$ ,  $m = 3, 5$ . Более того, его можно представить в виде  $L(s) = L^1(s) + sL^0(s)$ , где  $L^1$  и  $L^0$  соответственно суть кососимметричный оператор, аппроксимирующий производную  $u_x$  с  $m+1$ -м порядком, и самосопряженный положительный оператор, определяющий вносимый схемой диссипативный механизм порядка  $m$ . При этом, например, при аппроксимации уравнения переноса  $u_t + au_x = 0$  для положительности оператора  $aL(s)$  следует выбрать знак  $s$  совпадающим со знаком  $a$ . Благодаря такой структуре схемы, основанные на семействах КА, с высокой точностью описывают тонкие детали решений в широком диапазоне волновых чисел, допускаемых сетками и имеющими физический смысл, и фильтруют “нефизичные” мелкомасштабные компоненты, вносимые схемой. С другой стороны, наличие диссипативного механизма делает их устойчивыми и надежными при решении различных задач.

Для того чтобы строить схемы с положительными операторами в случае систем уравнений гиперболического типа, первоначально использовалась идея диагонализации матриц-коэффициентов при первых производных. При этом вместо скаляра  $s$  вводилась матрица,

учитывающая знаки их собственных значений. В дальнейшем стала применяться более простая и универсальная идея расщепления потоков. В простейшем случае ее можно проиллюстрировать следующим образом. Пусть требуется аппроксимировать производную  $\mathbf{f}(\mathbf{u})_x$ , где  $\mathbf{f}$  и  $\mathbf{u}$  суть векторные функции. Выбрав положительный параметр  $s$ , запишем эту аппроксимацию в виде

$$\mathbf{f}(\mathbf{u})_x = (L(s)(\mathbf{f} + C\mathbf{u}) + L(-s)(\mathbf{f} - C\mathbf{u}))/2,$$

где  $C$  есть положительная константа, являющаяся параметром схемы. Можно показать, что в случае линейной функции  $\mathbf{f}$  оператор численного дифференцирования, определенный таким образом, является положительным несамосопряженным оператором.

Различные варианты компактных схем приведены в [3]. Они включают в себя симметричные (центрированные) аппроксимации вторых производных для уравнений Навье-Стокса, аппроксимации производных по времени, ограничители потоков для расчета различных течений и т.д. В зарубежных публикациях разработанные нецентрированные КА были обозначены как Compact Upwind Differencing (CUD), а различные их версии и порядки отмечались римскими и арабскими цифрами (например, CUD-II-3 для одного из вариантов схем третьего порядка).

3. Разработанные методики тщательно тестировались на модельных задачах. Основными из них были задачи Коши для уравнений Бюргерса

$$u_t + (u^2/2)_x = 0 \quad \text{или} \quad u_t + (u^2/2)_x = \nu u_{xx},$$

где  $\nu$  есть коэффициент вязкости. Расчеты на разных сетках показали, что точность компактных схем на порядки превосходит точность стандартных схем даже на относительно грубых сетках. Основные расчеты, проводившиеся в отделе в течение последнего десятилетия, связаны с численным моделированием на основе уравнений Навье-Стокса в задачах несжимаемой жидкости и сжимаемого газа. Одним из примеров является трансзвуковое течение вязкого газа в статоре турбины [4]. Сравнение газодинамических полей с данными, полученными на основе схемы второго порядка показало, что использование более грубых сеток и компактных схем пятого порядка, позволяет ускорить процесс получения решений с одной и той же точностью приблизительно в 20 раз.

Более внушительные оценки получились при сравнении со стандартными схемами второго порядка в случае задачи о распространении вихрей равномерным потоком невязкого газа. Оказалось, что время счета на персональном компьютере небольшой производительности для получения решения с некоторой фиксированной точностью в случае схемы пятого порядка составляет 20 минут. Оценки времени счета на этом же компьютере для схемы второго порядка, полученные на основе ее скорости сеточной сходимости и необходимых размеров сетки, показали, что для достижения такой же точности требуется 82 года. Различные версии компактных аппроксимаций использовались при расчете двумерных ламинарных и турбулентных течений сжимаемого газа (стационарных и нестационарных) в задачах внешнего обтекания [5–8], а также пространственных течений [9]. В рамках проекта INTAS-1817 компактные схемы пятого порядка применялись при численном моделировании вихревых следов за совершающими посадку тяжелыми авиалайнерами. Такие вихревые следы могут создавать серьезные проблемы с точки зрения безопасности полетов других самолетов.

В качестве развития идеи нецентрированных аппроксимаций были разработаны высокоточные компактные аппроксимации [10] на основе конечно-объемного подхода. Для этих схем был доказан ряд законов геометрического сохранения, что позволило резко увеличить точность моделирования для задач со сложной геометрией. На основе данного подхода было успешно проведено численное моделирование пространственных нестационарных течений жидкости в реакторах смешения с активными элементами.

Компактные схемы пятого порядка использовались для численного моделирования течений несжимаемой жидкости. Рассматривались как задачи обтекания [11], так и задачи о потере устойчивости, предъявляющие особо жесткие требования точности и “робастности” схемы. Последние представляют особый интерес, поскольку позволяют исследовать эволюцию вихревых образований, процессы турбулизации и генерацию звука. Первые результаты в этом направлении были представлены в [12], а их продолжение — в [13]. Бурное увеличение быстродействия и памяти компьютеров позволили в последнее время продолжить эти исследования и осуществить

прямое численное моделирование как двумерных, так и трехмерных течений. От многих других исследований в этом направлении полученные данные отличаются гарантированной высокой точностью описания мельчайших деталей течения.

### 3. Мультиоператорные аппроксимации и схемы произвольного порядка для параллельных вычислений

1. На конференции по параллельным вычислениям в Манчестере в 1998 г. был впервые доложен совершенно новый принцип построения схем произвольного порядка [14]. Он основан на следующем свойстве компактных аппроксимаций: коэффициенты перед степенями шага  $h$  в погрешностях аппроксимаций для оператора  $L(s) = P^{-1}(s)Q(s)$  являются полиномами от  $s$ , степени которых возрастают со степенями  $h$ . Основываясь на этом свойстве, можно показать, что если  $L(s)u_j = (u_x)_j + O(h^m)$ , то выбрав  $M$  различных значений параметра  $s$ , всегда однозначным образом можно найти в аналитической форме такие коэффициенты  $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_M$ , что имеет место оценка

$$L_M u_j = \left( \sum_{i=1}^M \gamma_i L(s_i) \right) u_i = (u_x)_j + O(h^{m+M-1}).$$

Было показано, что эти коэффициенты являются решением линейной системы с матрицей Вандермонда, образованной степенями  $s_i$ . Оператор  $L_M$  естественно назвать мультиоператором, а операторы  $L(s_i)$ ,  $i = 1, 2, \dots, M$ , можно рассматривать как базисные. Из структуры мультиоператора видно, что вычисление его действия на известную сеточную функцию можно осуществить на  $M$  процессорах, каждый из которых синхронно с остальными вычисляет его действие со “своим” значением  $s_i$ . Таким образом, взяв простейший оператор  $L(s)$ , можно образовать мультиоператор и повысить порядок точности до желаемого простым увеличением числа процессоров. Некоторое ограничение на число  $M$  накладывает ухудшение обусловленности матрица Вандермонда с его ростом (происходит увеличение абсолютных значений коэффициентов). Это ухудшение можно компенсировать выбором нулей полинома Чебышева в качестве значений  $s_i$ , так что

$$s_i = \left( s_{\min} + s_{\max} + (s_{\max} - s_{\min}) \cos \frac{(2n+1)\pi}{2M} \right) / 2, \quad n = 0, 1, 2, \dots, M-1,$$

где  $s_{\min}$  и  $s_{\max}$  являются задаваемыми параметрами.

Теоретические исследования мультиоператоров [15, 16] показали, что при надлежащем выборе  $s_{\min}$  и  $s_{\max}$  они наследуют основные свойства базисных операторов: знакоопределенность ( $L_M > 0$  или  $L_M < 0$ ) и изменение положительности на отрицательность (или наоборот) при изменении всех знаков в наборе  $s_i$ . Это позволяет строить высокоточные и устойчивые противопотоковые мультиоператорные схемы для уравнений механики жидкости и газа. В последнее время мультиоператорная схема седьмого порядка, основанная на базисных операторах третьего порядка, была реализована на кластере ВЦ РАН с использованием пяти процессоров. Она позволила на очень подробных сетках (до четырех миллионов узлов) осуществить прямое численное моделирование турбулентности, возбуждаемое неустойчивостью сдвиговых слоев несжимаемой жидкости с полным разрешением мелких масштабов. Созданная анимация позволила наблюдать каскад передачи энергии к большим волновым числам.

При построении мультиоператоров существенно использовалась зависимость базисных операторов от параметра, определяющего их “ориентацию” (против потока или по потоку). В то же время существуют центрированные компактные аппроксимации производных, основанные на симметричных формулах. Они имеют ту же форму  $P^{-1}Q$  с той лишь разницей, что операторы  $P$  и  $Q$  содержат только численные коэффициенты. В [17] был предложен способ построения мультиоператоров и в этом случае. Он состоит в искусственном введении параметра в эти операторы. При этом базисные операторы оказываются более низкого порядка, чем первоначальные, но зато открывается возможность повышения их порядка до желаемого путем фиксации значений введенного параметра и образования их линейных комбинаций с найденными коэффициентами. Такие мультиоператоры могут быть использованы при аппроксимации членов с вязкостью в уравнениях Навье–Стокса, а также при решении задач эллиптического типа (например, задач теории упругости).

2. Остановимся на последних результатах в области компактных аппроксимаций и построенных на их основе мультиоператоров. Было обнаружено новое семейство КА, в котором операторы  $P$  являются двухточечными “односторонними” операторами [18]. Их можно определить формулами для “левых” или “правых” операторов

$$Pu_j = u_j + c(u_j - u_{j-1}) \quad \text{или} \quad Pu_j = u_j + c(u_{j+1} - u_j),$$

в которых  $0 < c < 1$  является параметром. Такие КА обладают рядом достоинств. Во-первых, обращение двухточечных операторов требует на порядок меньшее количество арифметических операций, чем трехточечных. Во-вторых, они позволяют получить односторонние аппроксимации, существенные при конструировании граничных операторов для любого типа компактных схем. Фиксируя набор параметров  $c_1, c_2, \dots, c_M$  и используя операторы  $P^{-1}(c_i)Q(c_i)$  из нового семейства в качестве базисных, можно построить мультиоператорные аппроксимации производных и схемы с положительными операторами. Были предложены варианты таких мультиоператоров.

Существенным расширением понятия компактных аппроксимаций является предложенное в [18] увеличение порядка известных формул численного анализа. Пусть имеется некоторая приближенная формула невысокого порядка  $(Lu)_j \approx L_h u_j$ , где  $(Lu)_j$  может быть одним из часто используемых функционалов (например, среднее значение, экстраполяция на один шаг, формула трапеций или Симпсона для интеграла по отрезку длиной  $h$  или  $2h$  и т. д.). Введем операторы  $P^{-1}L_h$  или  $L_h + P^{-1}Q$ , зависящие от параметра, которые можно рассматривать как мультипликативные и аддитивные поправки к оператору  $L_h$ . Подберем коэффициенты в  $P$  и  $Q$ , обеспечивающие максимальный порядок аппроксимации этих новых операторов. Если желательно увеличить его до назначенного, зафиксируем необходимое количество параметров (это могут быть параметры  $s, c$  или искусственно введенные параметры). Решив линейные системы и определив коэффициенты линейных комбинаций, образуем мультиоператоры, обеспечивающие заданный порядок.

В заключение отметим, что для реализации очень высоких порядков мультиоператорных аппроксимаций разрядность арифметики в случае 32-разрядных процессоров оказывается недостаточной. В этом случае может быть полезна разработанная в отделе компьютерная программа, увеличивающая точность машинной арифметики [19].

#### **4. Бессеточный метод, основанный на применении радиальных базисных функций в режиме разностных схем**

1. Достижение высокого порядка сеточной сходимости в случае схем любого типа основано на гладкости тех функций, к которым применяются сеточные операторы. Это означает, что метрические коэффициенты, возникающие при переходе к той или иной сетке в расчетной плоскости должны иметь достаточную степень гладкости. В случае сложных геометрических форм областей в физической плоскости построение сеток, удовлетворяющих этому требованию, может стать отдельной весьма сложной задачей. Некоторой альтернативой в таких случаях может служить использование так называемых бессеточных методов. В классе аппроксимаций интерполяционного типа популярность в недавнее время приобрели радиальные базисные функции (РБФ), т. е. функции вида  $\phi(\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_k\|)$ , где  $\|\cdot\|$  — евклидова норма. Другими словами РБФ — это функции, аргументами которых являются расстояния точки  $\mathbf{x}$ , (вообще говоря, в  $n$ -мерном пространстве) до произвольно расположенных точек  $\mathbf{x}_k$ ,  $k = 1, 2, \dots, K$ . Линейная комбинация РБФ с обычными условиями интерполяции для аппроксимируемой функции приводит к РБФ-интерполянту, который может быть использован для дискретизации уравнений в частных производных. При этом приходится решать линейную систему для определения коэффициентов интерполяции.

2. Если РБФ вследствие своей высокой точности нашли широкое применение в теории и практике аппроксимаций, то их использование при решении уравнений в частных производных оказалось сравнительно редким. Основными подходами здесь являются методы коллокации и граничных элементов с использованием всех  $K$  узлов в расчетной области. Основная трудность здесь состоит в плохой обусловленности системы для РБФ-коэффициентов в случае большого числа  $K$ . Чтобы преодолеть эту трудность, но в то же время сохранить достоинства

РБФ-аппроксимаций, в отделе была разработана новая методика применения РБФ. Вместо глобальной интерполяции было предложено для каждого узла  $\mathbf{x}_j$  выбрать  $K_j$  соседей, образующих множество точек, для которых строится “свой” интерполянт с последующей аппроксимацией производных в рассматриваемом уравнении [20]. При этом возникает полнейшая аналогия с конечно-разностными схемами, а само множество точек может быть названо шаблоном. Разница состоит лишь в том, что вместо полиномиального базиса используются РБФ. Предложенный подход позволяет аппроксимировать производные в уравнениях в декартовой системе координат с нужным расположением узлов либо во всей области, либо в ее части. В последнем случае в остальной части можно использовать разностные схемы в рамках методики разделения областей. Получаемые аппроксимации могут быть достаточно точными. Например, для некоторых классов функций показана экспоненциальная сходимости интерполянтов к интерполируемым функциям.

Предложенный РБФ-метод был использован при решении задач механики твердого деформируемого тела. Во всех случаях использовались популярные РБФ вида

$$\phi(\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_k\|) = ((x - x_k)^2 + (y - y_k)^2 + 1)^{1/2}$$

(multiquadrics). Точность получаемых решений оказалась выше, чем в случае стандартных конечно-элементных методов с тем же количеством степеней свободы. Рассматривались задачи о деформации балок и оболочек с достаточно сложными формами границ расчетных областей [21]. В рамках проекта INTAS-1150 методика применялась для решения задачи формообразования в условиях ползучести с циклами нагружение-разгрузка.

Были исследованы также шаблоны, обеспечивающие устойчивость РБФ-схем в случае уравнений с конвективными членами. После тестирования на модельных задачах методика была использована для решения уравнений Навье–Стокса сжимаемого газа [22]. В качестве основной рассматривалась задача об обтекании крылового профиля в условиях нарастающего на его поверхности льда. В этом случае форма твердой границы может стать нерегулярной, что делает затруднительным построение сеток для схем высокого порядка. При расчетах применялся принцип декомпозиции областей, при котором в окрестности носовой части уравнения аппроксимировались на основе РБФ-методики, а в остальной части использовалась КА-схема со стандартной сеткой типа  $C$ . Для определения количества воды, попадающей на элементы поверхности, использовалась специально разработанная модель высокого уровня для течения двухфазного воздушно-капельного потока [23].

## **5. Численные методы линейной алгебры, параллельные вычисления и геометрическое моделирование**

В секторе “Центр суперкомпьютерных и массивно-параллельных приложений” отдела в последние годы активно ведется разработка высокоточных методов моделирования с использованием параллельных вычислений, алгоритмов решения больших жестких систем алгебраических уравнений, параллельных методов линейной алгебры. Большое внимание уделяется построению расчетных сеток на основе теории квазиизометричных отображений, а также вариационным методам в задачах геометрического моделирования.

К основным научным результатам в этих направлениях можно отнести следующие.

1. Для решения пространственных задач фильтрации в случае, когда имеют место большие скачки проницаемости среды, была предложена схема аппроксимации уравнений фильтрации с отклонением от закона Дарси [24]. Были доказаны свойства геометрического сохранения и условие кусочного тестирования при использовании сильно искаженных гексаэдральных элементов. В численных экспериментах предложенная методика позволила получить результаты, существенно более точные по сравнению с методами смешанных конечных элементов с тем же числом степеней свободы. Этот подход был успешно применен для моделирования течения газа вблизи скважин.

2. Был предложен принципиально новый метод построения преобуславливателей для решения СЛАУ с симметричными положительно-определенными матрицами методом сопряженных градиентов [25–27]. Как известно, классические оценки сходимости МСГ используют в качестве меры спектральное число обусловленности. Было показано, что на самом деле скорость сходимости зависит от всех собственных значений матрицы и выражается через специальную квазивы-

пуклую меру качества матрицы. Главным преимуществом этой меры является конструктивность, т.е. удастся сформулировать и решить задачу о выборе оптимального переобуславливателя в классе неполных факторизаций. При этом удалось доказать, что процедура построения предобуславливателя устойчива для положительно определенных матриц и для них не требуется диагонального преобладания.

На основе этого теоретического подхода была решена задача поиска оптимального параллельного предобуславливателя [28, 29]. Численное решение больших жестких СЛАУ, возникающих в самых разных областях, в том числе в задачах механики, продемонстрировало эффективность и устойчивость параллельного метода решения.

3. Был предложен [30–32] вариационный метод построения многомерных квазиизометричных отображений, а также построения квазиизометричных координат на многообразиях ограниченной кривизны в смысле А.Д. Александрова. На основе теории существования для поливыпуклых функционалов для этого вариационного принципа была доказана теорема существования. Впервые было показано, что вариационный метод позволяет получать взаимно-однозначные многомерные квазиизометричные отображения. На основе этого подхода был предложен метод построения расчетных сеток с прецизионным управлением формой, размером и ориентацией ячеек [33, 34]. Этот метод был успешно применен в сложных задачах САПР и машинной геометрии, таких как реконструкция и оптимальная параметризация поверхностей, распластывание сложных поверхностей в задачах штамповки и вычислительной анатомии.

4. Был предложен новый метод решения нелинейных систем алгебраических уравнений и конечномерных вариационных задач [35, 36]. Было показано, что при использовании предобусловленных итерационных методов спуска не нужно точно обращать предобуславливатель. Чем больше некая мера нелинейности задачи, тем с большей ошибкой можно решать задачу обращения предобуславливателя. Было показано, как связать меру нелинейности задачи с критерием остановки метода сопряженных градиентов для внутренних итераций.

5. Были построены быстрые приближенные методы решения СЛАУ с плотными матрицами большой размерности. При этом плотная матрица локально приближается матрицей малого ранга или разреженной матрицей, что позволяет решать системы с плотными матрицами с сотнями тысяч неизвестных.

## Литература

1. Толстых А. И. О методе численного решения уравнений Навье-Стокса сжимаемого газа в широком диапазоне чисел Рейнольдса // Докл. АН СССР. 1973. Т. 210. № 3. С. 48–51.
2. Толстых А.И. Компактные разностные схемы и их применение в задачах аэрогидродинамики. М.:Наука, 1990.
3. Tolstykh A.I. High accuracy non-centered compact difference schemes for fluid dynamics applications. Singapore.:World Scientific, 1994.
4. Tolstykh A.I., Lipavskii M.V. On Performance of Methods with Third-and Fifth-Order Compact Upwind Differencing // J. Comput. Phys. 1998. V. 140. P. 205–232.
5. Савельев А.Д., Толстых А.И. Численные алгоритмы для течений вязкого газа, основанные на компактных аппроксимациях третьего порядка // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1987. Т. 27, № 11. С. 1709–1724.
6. Савельев А.Д. Неявный метод расчета турбулентных течений вязкого сжимаемого газа // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1998. Т. 38, № 3. С. 522–533.
7. Савельев А.Д. О влиянии задней кромки каверны на интенсивность пульсаций потока. // Изв. РАН. МЖГ. 2001. № 3, С. 79–89.
8. Савельев А.Д. Расчеты течений вязкого газа на основе  $(q - \nu)$ -модели турбулентности. //Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 2003. Т. 43, № 4. С. 591–602.
9. Толстых А.И., Ширококов Д.А. О разностных схемах с компактными аппроксимациями пятого порядка для пространственных течений вязкого газа // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1996. Т. 36, № 4. С. 71–85.
10. Гаранжа В.А., Коньшин В.Н. Численные алгоритмы для течений вязкой несжимаемой жидкости, основанные на консервативных компактных схемах высокого порядка аппроксимации //Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1999. Т. 39, № 8. С. 1378–1392.
11. Гаранжа В.А., Толстых А.И. О численном моделировании нестационарных отрывных течений несжимаемой жидкости на основе компактных аппроксимаций пятого порядка // Докл. АН СССР. 1990. Т. 312, № 2. С. 311–314.

12. Tolstykh A.I., Chigerev E.N. On thin layers numerical simulation // J. Comput. Phys. 2001. V. 166. P. 205–232.
13. Липавский М.В., Чигерев Е.Н. Численное исследование вихревых движений с помощью нецентрированных компактных аппроксимаций. М.: ВЦ РАН, 2004.
14. Tolstykh A.I. Multioperator high-order compact upwind methods for CFD parallel calculations // Parallel Computational Fluid Dynamics, Elsevier, Amsterdam (1998). P. 383–390.
15. Толстых А.И. Построение схем заданного порядка с линейными комбинациями операторов // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 2000. Т. 40, № 8. С 1206–1220.
16. Липавский М.В., Толстых А.И. Мультиоператорные компактные схемы 5-го и 7-го порядков // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 2003. Т. 43. № 7. С 1018–1034.
17. Толстых А.И. Об интегроинтерполяционных схемах заданного порядка и других приложениях мультиоператорного принципа // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 2002. Т. 42, № 11. С. 1712–1726.
18. Толстых А.И. Об одном семействе компактных аппроксимаций и основанных на них мультиоператорных аппроксимациях заданного порядка // ДАН. 2005. Т. 403, № 2. С. 172–177.
19. Липавский М.В. Пакет арифметики высокой точности QUAD. М.: ВЦ РАН, 2001.
20. Tolstykh A.I. On using RBF-based differencing formulas for unstructured and mixed structured-unstructured grid calculations // In Proceedings of 16th IMACS World Congress. Lausanne, 2000.
21. Tolstykh A.I., Shirobokov D.A. On using radial basis functions in a “finite difference mode” with applications to elasticity problems // Comput. Mech. 2003. V. 33. P. 68–79.
22. Толстых А.И., Ширококов Д.А. Бессеточный метод на основе радиальных базисных функций // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 2005. Т. 45, № 8. С. 1498–1505.
23. Стасенко А.Л., Толстых А.И., Ширококов Д.А. Динамика деформируемых капель у поверхности крыла в вязком воздухе // Изв. РАН. МЖГ. 2002. № 5. С. 180–189.
24. Garanzha V.A., Konshin V.N., Lyons S.L., Papavassiliou D.V. and Qin G. Validation of non-Darcy well models using direct numerical simulation in “Numerical Treatment of Multiphase Flows in Porous Media” / Eds. Chen, Ewing and Shi. Lecture Notes in Physics. Springer-Verlag, 2000. V. 552. P. 156–169.
25. Kaporin I.E. High quality preconditioning of a general symmetric positive matrix based on its  $U^T U + U^T R + R^T U$ -decomposition // Numerical Linear Algebra Appl. 1998. V. 5. P. 484–509.
26. Axelsson O. and Kaporin I. On the sublinear and superlinear rate of convergence of conjugate gradient methods // Numerical Algorithms. 2000. V. 25. P. 1–22.
27. Kaporin I.E. Using the Modified 2nd Order Incomplete Cholesky Decomposition as the Conjugate Gradient Preconditioning // Numerical Linear Algebra with Applications. 2002. V. 9. P. 401–408.
28. Капорин И.Е., Коншин И.Н. Параллельное решение симметричных положительно-определенных систем на основе перекрывающегося разбиения на блоки // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 2001. Т. 41, № 4. С. 515–528.
29. Kaporin I.E., Konshin I.N. A parallel block overlap preconditioning with inexact submatrix inversion for linear elasticity problems // Numerical Linear Algebra with Applications. 2002. V. 9. P. 141–162.
30. Гаранжа В.А., Капорин И.Е. Регуляризация барьерного вариационного метода построения расчетных сеток // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1999. Т. 39. № 9. С. 1489–1503.
31. Гаранжа В.А. Барьерный метод построения квазиизометричных сеток // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 2000. Т. 40, № 11. С. 1685–1705.
32. Гаранжа В.А. Управление метрическими свойствами пространственных отображений // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 2003. Т. 43. № 6.
33. Garanzha V.A. Variational principles in grid generation and geometric modelling: theoretical justifications and open problems // Numerical Linear Algebra with Applications. 2004. V. 11. № 5, 6. P. 535–564.
34. Garanzha V.A. Barrier variational generation of quasi-isometric grids // Numer. Linear Algebra Appl. 2001. V. 8. P. 329–353.
35. Axelsson O. and Kaporin I. A survey of Newton type methods for solving nonlinear boundary value problems // Hellenic European Research on Mathematics and Information Science. 2000. V. 1. P. 93–108.
36. Капорин И.Е. Использование внутренних итераций метода сопряженных градиентов при решении больших разреженных нелинейных задач оптимизации // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 2003. Т. 43. С. 802–807.



## ОТДЕЛ МЕХАНИКИ СПЛОШНЫХ СРЕД

*В.И. Жук, В.Н. Котеров, В.П. Пархоменко, А.А. Чарахчян, Ю.Д. Шмыглевский*

---

Отдел был создан в составе лаборатории программирования, позже выделился в самостоятельную лабораторию, а затем вместе с другими лабораториями стал называться отделом. Первоначально его работа была посвящена созданию аналитических и численных методов газовой динамики с использованием появившихся тогда ЭВМ. Общее развитие науки и техники уже тогда потребовало учета физических и химических процессов в потоках жидкости и газа и привело к значительному разнообразию исследований, которое можно наблюдать и в работах отдела. Вместе с изучением свойств исходных уравнений, описывающих течения, и их решений ведется развитие численных методов для их расчета.

За 50 лет работы сотрудники отдела опубликовали около 700 статей, брошюр и книг. В обзоре описываются главные направления работ отдела и даются ссылки на их публикации, а они, в свою очередь, могут содержать списки более ранних работ сотрудников отдела по рассматриваемой теме и позволяют детально познакомиться с достигнутыми результатами. Фамилии авторов перед номерами ссылок означают, что работы выполнены не сотрудниками ВЦ РАН. Если публикация выполнена в ВЦ АН автором, перешедшим в дальнейшем на другую работу, то этот переход в ссылке не отражается.

**Вариационные принципы газовой динамики.** Обобщение вариационного принципа Бейтмана для течений баротропного газа привело Ито к принципу для изоэнергетических течений. В случае стационарных течений этот принцип содержит зависимость от времени. В общем случае равновесных течений газа в [1] предложено обобщение принципа Ито также в интегральном виде без дополнительных связей. При получении из этого принципа уравнений газовой динамики для перехода к традиционным переменным проводится замена переменных с помощью подходящей формы первого начала термодинамики.

Аналогично предлагается [1] вариационный принцип магнитной гидродинамики при бесконечной проводимости.

**Полные системы законов сохранения динамики идеального газа, магнитной и электромагнитной гидродинамики.** Непосредственное применение теоремы Нётер, справедливой для систем уравнений второго порядка, для получения полных систем законов сохранения в перечисленных областях невозможно, поскольку они описываются системами первого порядка. Для достижения цели используется прямой подход. Искомые уравнения записываются в дивергентной форме

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial B}{\partial x} + \frac{\partial C}{\partial y} + \frac{\partial D}{\partial z} = 0, \quad (*)$$

где подлежащие определению  $A$ ,  $B$ ,  $C$  и  $D$  зависят от всех переменных изучаемой системы уравнений. Проведение дифференцирования в (\*) приводит к сумме переменных коэффициентов, умноженных на единицу и на производные от искомым функций. Наибольшее возможное количество этих производных исключается с использованием рассматриваемой системы уравнений. Коэффициенты при единице и оставшихся производных приравниваются к нулю. Возникают переопределенные системы дифференциальных уравнений для  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  с независимыми переменными, от которых зависят эти функции. В случае газовой динамики, магнитной гидродинамики при бесконечной и конечной проводимости, а также электромагнитной гидродинамики соответствующие переопределенные системы удается проинтегрировать до конца и получить результаты в явном виде [1].

**Газовая динамика.** Основой этих исследований первоначально стал метод интегральных соотношений [2, 3], сводящий в различных приближениях граничные задачи для дифференциальных уравнений с двумя независимыми переменными к задачам Коши или краевым задачам для

обыкновенных дифференциальных уравнений. Метод дает несколько более простые результаты, если исходные уравнения использовать в виде законов сохранения, но, естественно, решение краевых задач для нелинейных уравнений остается всегда сложной проблемой, преодоление которой говорит об искусстве авторов.

В отделе механики сплошных сред первые применения метода относились к плоскопараллельным и осесимметричным установившимся течениям. Расчеты дозвукового обтекания эллипсов и эллипсоидов [4, 5] позволили определить критические числа Маха  $M$  набегающего потока, когда на обтекаемом профиле существует звуковая точка ( $M = 1$ ). Среди потенциальных течений рассчитывались также возникающее при обтекании произвольного симметричного профиля и тела вращения дозвуковым потоком на нулевом угле атаки, при обтекании эллиптического профиля звуковым ( $M_\infty = 1$ ) на бесконечности потоком с образованием зоны сверхзвуковых скоростей за звуковой

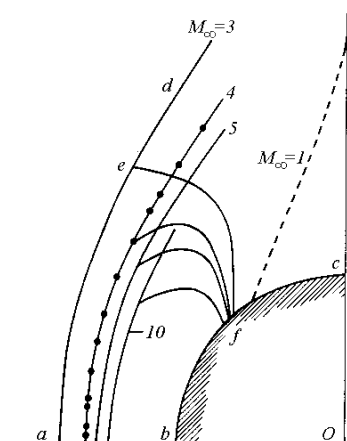


Рис. 1. Ударные волны и звуковые линии при обтекании цилиндра при числе Маха  $M_\infty$ . Точками отмечены экспериментальные данные

линией (рис. 1, штриховая линия), а также при дозвуковом втекании газа в плоские и осесимметричные сопла Лавалья с переходом на сверхзвуковые скорости в узком сечении сопла [5, 6]. В трансзвуковой области сопел аппроксимирующая система нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений, порождаемая методом интегральных соотношений, имеет особые точки типа седла, а задача для этих уравнений становится краевой.

Использование метода позволило впервые [5, 7] провести расчет обтекания симметричных затупленных тел сверхзвуковым набегающим потоком. В этом случае необходимо решать стационарный вариант уравнений газовой динамики в области (рис. 1), которая ограничена осью симметрии  $aO$ , контуром тела  $bc$  и ударной волной  $ad$ , отделяющей набегающий поток от области дозвукового течения. В области перехода течения в сверхзвуковое (окрестность звуковой линии  $ef$ ) выдвигается требование непрерывности функций. При аппроксимации функций поперек слоя между телом и ударной волной с известными условиями на них (схема 1) метод интегральных соотношений приводит к системе обыкновенных дифференциальных уравнений с условиями в точках, отвечающих оси симметрии и трансзвуковой области. На рис. 1 изображены результаты при числах Маха набегающего потока от 1 до 10 в плоскопараллельном случае. Точками на ударной волне показаны результаты эксперимента Кима [8]. Для сравнения использовалась аппроксимация вдоль линий, расположенных между контуром тела и ударной волной (схема 2).

Результаты расчетов обтекания круга и шара, эллипсов и сфероидов, а также негладких тел с изломом контура или разрывом кривизны при различных числах Маха набегающего потока приведены в [9]. Там же можно найти многие результаты расчета подобных неравновесных течений. Обтеканию клина и конуса с отошедшей ударной волной при различных углах атаки посвящен ряд работ и, в частности, [10]. Применение метода интегральных соотношений обобщено на описание обтекания тел уравнениями магнитной гидродинамики [11].

К задаче сверхзвукового обтекания затупления математически близка задача о расчете сверхзвуковых конических течений без осевой симметрии, если ее с учетом автомодельности решать в двух независимых переменных [12]. Сверхзвуковые двумерные (плоские и осесимметричные) стационарные течения газа успешно рассчитываются с помощью метода характеристик. При всей его логической простоте для становления метода была проведена значительная работа. Алгоритмы ориентированного на использование ЭВМ метода в случае совершенного газа опубликованы в [13]. Построены схемы для расчета изэнтропических и неизэнтропических равновесных течений реального газа [14], а также для расчета неравновесных течений [15], причем здесь были преодолены трудности, связанные с сингулярностью релаксационных уравнений на границах зон равновесности. С помощью этих расчетных схем были изучены сверхзвуковые области при обтекании затупленных

тел, свободное истечение газа через круглое отверстие с плоской поверхностью перехода, течения в соплах, внешнее обтекание тел вращения с протоком при образовании головной ударной волны, примеры неравновесных течений и движение проводящего газа в канале при наличии магнитного поля с малыми магнитными числами Рейнольдса [6, 13–16].

Трехмерное обтекание затупленных тел рассчитывается методом интегральных соотношений с предварительным проведением тригонометрических аппроксимаций по азимутальному углу [5], уменьшающих число независимых переменных до двух. Схема 1 с аппроксимацией функций на линиях, соединяющих поверхность тела и ударную волну, применялась, в частности, для расчета обтекания совершенным газом конуса с большим углом раствора и малым затуплением под углом атаки [17], а схема 2 была разработана в пространственном случае в [9] для совершенного газа, а затем развита для неравновесных потоков.

При создании трехмерного метода характеристик для расчета пространственных сверхзвуковых течений разнообразие численных схем определяется выбором расчетных шаблонов и конечно-разностных аппроксимаций на них. В результате возникают явные или неявные схемы разного порядка точности и, кроме того, выбор двух независимых условий совместности при эквивалентности исходной системе уравнений создает новое разнообразие. К этому ведет и возможность построения шаблонов на сетках с фиксированными узлами. Обзор и анализ ряда схем метода опубликован в [18].

Метод характеристик использовался для расчета безвихревых течений в пространственных соплах и для расчета обтекания тел под углом атаки при возникновении головных ударных волн. В первом случае реализованы явная тетраэдральная [19] и неявная призматическая [20] схемы, устойчивость которых исследована в [21]. Схема, основанная на аппроксимации уравнений по азимутальной переменной и возникающих обыкновенных дифференциальных уравнений вдоль аналогов характеристик двумерных уравнений, построена и испытана в [22]. По разработанной схеме проведено численное исследование сверхзвукового обтекания под углом атаки затупленных конусов и тел вращения с протоком равновесным воздухом. Обобщенная на случай неравновесных течений диссоциирующего кислорода схема использовалась для расчета течения внутри сопла эллиптического поперечного сечения, а также обтекания сфероида с гладко присоединенным к нему обратным конусом [23].

**Вариационные задачи газовой динамики.** Интерес к оптимизации формы тел и каналов сохраняется на протяжении всех пятидесяти лет существования Вычислительного центра и охватывает как двумерные, так и трехмерные течения.

Первоначально в случае двумерных сверхзвуковых течений отыскивалась форма тел и сопел, имеющих при заданных габаритах минимальное волновое сопротивление или максимальную силу тяги соответственно. Идея, предложенная А.А. Никольским [24] для линеаризованных уравнений газовой динамики, позволяет и в нелинейном случае сводить определенные двумерные вариационные задачи к одномерным. Таковы, например, задачи, в которых габаритные размеры, непротекание через поверхность тела и его волновое сопротивление могут быть выражены через переменные на контрольном контуре (на проходящих через концевые точки искомого контура и пересекающихся характеристиках разных семейств). В этом случае на одной из характеристик функции от одной независимой переменной заданы, а на другой являются искомыми. Возникающие вариационные задачи оказываются вырожденными из-за квазилинейности уравнений газовой динамики. При их решении используются фазовые ограничения на искомые функции. Природа вырожденных задач была понята Д.Е. Охоцимским [25], который предложил и путь их решения. Законы сохранения, позволяющие переходить к одномерным задачам, уже описаны во втором разделе этого обзора. Сами задачи здесь будут представлены на примерах, а иные результаты будут упомянуты.

Оптимизация формы осесимметричного сопла с осью  $x$  подразумевает (рис. 2) построение его образующей  $ab$ , дающей максимальную тягу при заданном положении концевых точек  $a$  и  $b$  и известном течении на звуковой линии  $ae$ . Если контур сопла имеет в точке  $a$  излом, то из нее выйдет пучок характеристик, на которых все известно. Положение последней характеристики пучка  $ah$  подлежит определению. Тяга сопла, его габариты и нулевой расход через  $ab$  выражаются через функции на  $ah$  и  $hb$  в интегральной форме. Наконец, к связям добавляется условие совместности на характеристике  $hb$ . При решении вариационной задачи возникает система

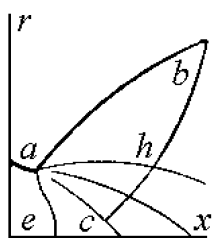


Рис. 2. Непрерывное решение

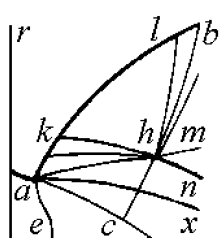


Рис. 3. Решение с изэнтропическим разрывом в точке  $h$  на  $cb$

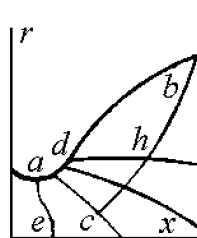


Рис. 4. Случай с ограничением кривизны контура горловины сопла

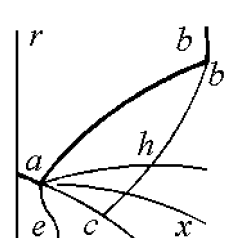


Рис. 5. Сопло с торцевой частью  $b'b$

уравнений Эйлера и краевые условия для нее. Гиперболичность системы уравнений газовой динамики при сверхзвуковых скоростях позволяет обнаружить, что множитель Лагранжа при условии совместности равен нулю, т.е. что условие совместности в этой задаче можно не использовать. Этот результат был получен в [26]. Годом позже Рао [27] при оптимизации формы сопла без пояснений не использовал условие совместности и, естественно, получил те же необходимые условия экстремума. В работе 2004 г. [28] установлены условия, при выполнении которых в вариационных задачах со связями в виде гиперболических уравнений использование условий совместности излишне. Таковыми оказываются задачи [26]. За выводом необходимых условий экстремума было проведено исследование необходимых условий максимума тяги [1], которые заставили найти новую схему течения в соплах (рис. 3); поток характеристик фокусируется в точке  $h$  безударным образом (без скачка энтропии), а из этой точки начинается ударная волна  $hn$ , контактный разрыв  $hm$  и пучок характеристик, частью которого является  $lhb$ .

При ограниченной кривизне контура  $ab$  схема течения может иметь вид, изображенный на рис. 4, и участок  $ad$  контура  $ab$  имеет предельную кривизну.

Если заданы не габариты сопла, а его длина и давление во внешнем потоке, то сопло может иметь торцевую часть  $b'b$  (рис. 5).

Обобщения на несовершенный газ проведены в [29].

В [1] дана сводка результатов оптимизации формы сопел, приведены результаты расчетов контуров оптимальных осесимметричных сопел всевозможных габаритов в случае двухатомного совершенного газа. Оказалось, что найденные схемы решения исчерпывают проблему при любых габаритах.

Аналогично оптимизации формы сопел проводится оптимизация формы тел в сверхзвуковом потоке, если задачи позволяют использовать контрольный контур.

При решении задач, не допускающих формулировку для функций на контрольном контуре, используется общий метод множителей Лагранжа. Первоначально он может приводить к неразрешимым задачам, но введение разрывов множителей Лагранжа [30] снимает проблему. В [31] найдено аналитическое решение для множителей Лагранжа в областях типа  $ahb$  на рис. 2. Полученные интегралы упрощают решение многих сложных задач.

Оптимизация формы крылового профиля в плоскопараллельном сверхзвуковом потоке заставляет прежде всего научиться оптимизировать форму контура, соединяющего две заданные точки и вызывающего возникновение присоединенной ударной волны (рис. 6). Решение этой задачи [32] показывает, что искомым контур имеет точки излома  $d, d_1, d_2, \dots$ , накапливающиеся при подходе к точке  $a$ . Изломы  $d, d_2, \dots$  являются началом пучков характеристик  $fdh, f_2d_2h_2, \dots$ , а изломы  $d_1, d_3, \dots$  — началом ударных волн  $d_1c_1, \dots$ . Ломаная  $cdc_1d_1c_2d_2 \dots$  является линией разрыва множителей Лагранжа. В особых случаях отражение ломаной в одной из точек на ударной волне не происходит и тогда контур  $ab$  имеет конечное число изломов. Частным случаем является контур без изломов [1] в плоском и осесимметричном случаях.

Задача оптимизации замкнутого контура решена в [33]. В работе [34] проводится оптимизация крылового профиля в несжимаемой жидкости при заданной подъемной силе. Решение сведено к отысканию экстремума функции нескольких переменных.

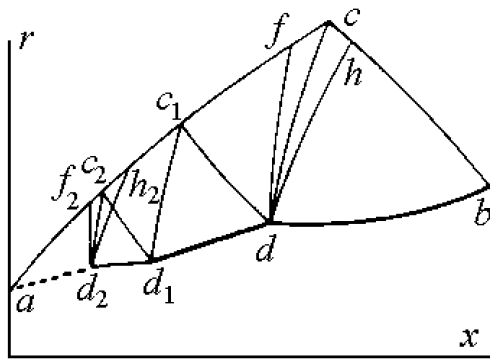


Рис. 6. Схема оптимального плоского профиля и его обтекания

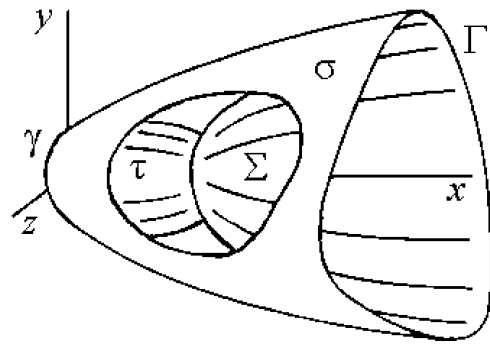


Рис. 7. Пространственное сопло  $\sigma$  и характеристические поверхности  $\tau$  и  $\Sigma$

Решение вырожденных вариационных задач обычно наталкивается на неожиданные препятствия, преодоление которых требует знания свойств решений задач данной области (например, газовой динамики). Некоторые примеры таких решений и ссылки на другие примеры можно найти в [1]. Оптимизация формы ствола гидропушки, стреляющей водой в условиях ее значительной сжимаемости, в гидравлическом приближении проведена в [35]. Оптимальный процесс плавления и кристаллизации вещества при осевой симметрии построен в [36].

Трехмерные вариационные задачи газовой динамики решаются с помощью общего метода множителей Лагранжа. В [37, 38] оптимизируется форма трехмерного сопла (рис. 7) с заданными замкнутыми контурами  $\gamma$  и  $\Gamma$ . Контур  $\gamma$  является окружностью, в плоскости которой поток имеет звуковую скорость и направлен по нормали к этой поверхности. Задача заключается в определении поверхности сопла  $\sigma$ , реализующей максимум силы тяги. Характеристические поверхности  $\tau$  и  $\Sigma$  проходят через контуры  $\gamma$  и  $\Gamma$  соответственно. Необходимые условия экстремума представляют собой краевую задачу для уравнений гиперболического типа. Итерационный процесс ее решения строится так, что на каждом этапе решаются граничные задачи типа Дарбу. Первая из них определяет потенциал скоростей при данных на  $\tau$  и  $\sigma$ , а вторая — множитель Лагранжа при данных на  $\Sigma$  и  $\sigma$ . Поверхность тока  $\sigma$  (поверхность сопла) должна обеспечивать максимальную силу тяги. В достижении этой цели и заключается задача. Реализованные пути ее решения различны [37–40]. Построению методов решения сопутствует исследование возникающих краевых задач для системы уравнений гиперболического типа — выявление схем решений, установление разрешимости сопряженной задачи для множителей Лагранжа [41], ее аналитическое решение при определенных условиях [42], изучение структур решений. Расчеты течений в соплах заданной формы, в соплах, создающих равномерный поток на выходе заданного вида, и в оптимальных соплах с заданным выходным сечением сведены в уникальный альбом [43].

**Теория взрыва и Тунгусского явления.** Одномерные задачи о взрыве с противодействием с мгновенным выделением энергии на плоскости, на оси и в точке соответственно в плоском, цилиндрическом и сферическом случаях решены для газов с различными показателями адиабаты при использовании асимптотического решения в окрестности источника взрыва [44]. Исследование неоднородных взрывов потребовало специального внимания к использованию и модификации расчетных схем, а также к изучению закономерностей распространения ударного фронта, контактной поверхности, отделяющей продукты взрыва от окружающей среды, и вторичной ударной волны. Распаду произвольного разрыва в несовершенном газе посвящена часть работ [45, 46]. Методом установления рассчитан распад разрыва на границе раздела между двумя совершенными газами, представляющей собой в начальный момент времени двугранный угол или конус. Подводный взрыв при цилиндрической или сферической симметрии численно исследован в [47], а взрывы на границе полупространства, заполненного совершенным газом, — в [48]. Расчетам взрывов цилиндрических зарядов конечной длины и брусков бесконечной длины с некруглыми поперечными сечениями посвящены публикации [49, 50].

Полет в неоднородной атмосфере тела, взрывающегося над поверхностью Земли, является наиболее вероятной схемой Тунгусского явления. Оно моделируется полубесконечным стержнем из взрывчатого вещества и завершаемым над поверхностью Земли бомбой. Взрыв распространяется по стержню к его концу и вызывает идущую перед взрывом баллистическую ударную волну. Наконец, взрывается бомба и возникает взрывная ударная волна. Процессы движения воздуха в атмосфере, начав действовать на Землю еще до взрыва бомбы, продолжают свое разрушительное воздействие на все находящееся на поверхности Земли. В память о Тунгусском

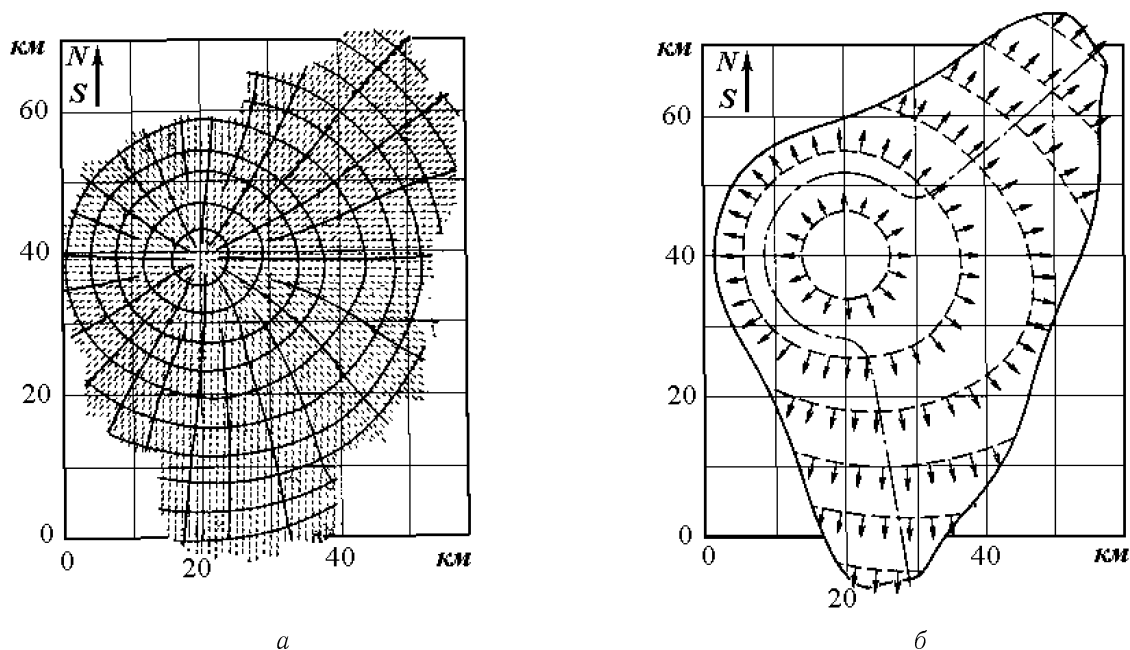


Рис. 8. Картина вывала леса после взрыва Тунгусского метеорита: а — съемки на местности, штрихи показывают направление повала леса; б — расчет, стрелки показывают направление повала леса

явлении осталась тщательно зафиксированная в дальнейшем исследователями картина повала леса (см. рис. 8, а). В описанной модели при всей ее простоте содержится ряд неизвестных параметров: угол наклона стержня к поверхности Земли, высота расположения бомбы над Землей, энергия взрыва единицы длины стержня, энергия взрыва бомбы и др. Задача заключается в определении таких значений этих параметров, при которых модель с достаточной точностью воспроизводит известную картину повала леса.

Расчеты проводились по схеме С.К. Годунова с некоторыми модификациями. Предварительные пробы метода расчета были применены в осесимметричном случае при равновесном состоянии воздуха. В расчете полета и взрыва Тунгусского метеорита баллистическая и взрывная волны моделировались ударными волнами при переменной удельной энергии взрыва вдоль стержня. Подбор параметров модели [51] привел к картине повала леса [52], изображенной на рис. 8, б. На рис. 8, а дана картина разрушений, опубликованная В.Г. Фастом, А.П. Баранником и С.А. Разиным [53]. На ней поле направлений упавших деревьев изображено штрихами, а построенная по этому полю система радиальных и замкнутых линий характеризует движение ударного фронта на Земле. На рис. 8, б штриховые линии показывают рассчитанные изохоры ударной волны на Земле, а стрелки — направления упавших деревьев. Рассчитанные параметры Тунгусского метеорита таковы: высота взрыва 6,5 км, угол наклона траектории  $40^\circ$ , тротильный эквивалент взрывной и баллистической волны в сумме 9,5 Мт. Оценки показывают, что включение неучтенных в расчетах факторов может увеличить эту величину до 15 Мт, что хорошо согласуется с последними результатами обработки имеющихся барограмм и сейсмограмм явления.

Дальнейшее исследование взрыва тел, летящих в неоднородной атмосфере, обратилось к влиянию излучения на проходящие процессы [54–56] и к уточнению других физических

воздействий [57–59]. При этом излучение моделировалось многогрупповым приближением по частоте и диффузионным приближением по телесному углу.

Продолжением исследований взрывных явлений стал цикл работ (см., например, [60–62]), в котором рассмотрены локальные и глобальные экстремально интенсивные взаимодействия облаков космических пылевых частиц с атмосферами Земли и Марса.

**Динамика излучающего газа и лазерный двигатель.** Под динамикой излучающего газа здесь подразумевается взаимно обусловленный процесс движения газа, переноса спектрального излучения и его поглощения. Система интегродифференциальных уравнений, описывающих такие процессы, настолько сложна, что при решении большинства задач в настоящее время поддается только численным методам.

Отдельные аналитические исследования проведены для изучения структуры ударных волн [63, 64], влияния излучения на сильный взрыв [54] и нелинейной акустики излучающего газа, которой посвящены три публикации, завершаемые в [65]. Аналитическим исследованиям трансзвуковых течений излучающего газа посвящены работы [66, 67].

Численное решение задач динамики излучающего газа проводится итерационным путем. Этапы этого пути включают методы интегрирования уравнения переноса, способы вычисления интегралов от интенсивности излучения по телесному углу и по частоте и интегрирование уравнений газовой динамики на одном итерационном шаге или шаге по времени при вычисленной величине лучистого теплоподвода. В публикациях [68–82] эти методы развивались и использовались для решения конкретных задач, а в дальнейшем использовались в [83–89].

Интегрирование уравнения переноса интенсивности излучения вдоль луча можно проводить со вторым порядком точности при кусочно-постоянной аппроксимации функции источника на шагах интегрирования. Принципиально важный результат [68] заключается в недопустимости такой аппроксимации для получения правильного значения интеграла от интенсивности по телесному углу на оптически грубой сетке (при больших значениях произведения коэффициента поглощения на геометрический шаг), поскольку при этом не воспроизводится режим лучистой теплопроводности. Для получения правильного результата следует либо геометрический шаг сетки брать намного меньшим, чем единица, деленная на максимальное значение коэффициента поглощения в поле течения, либо использовать кусочно-линейную аппроксимацию функции источника при допустимой кусочно-постоянной аппроксимации коэффициента поглощения вдоль луча.

Интегрирование интенсивности излучения по телесному углу с использованием квадратурного метода Гаусса выполнено в [69, 70]. Эквивалентность метода сферических гармоник, дискретных координат и экспоненциальной аппроксимации при интегрировании по телесному углу в плоскопараллельных течениях раскрыта в [71], а исследование второго из этих методов проведено в [72]. Вариационные принципы для уравнения переноса предложены в [73]. Интегрированию уравнения переноса в рассеивающем газе посвящена статья [74], а интегрированию при комптоновском рассеянии — [75].

Спектральность при решении задач динамики излучающего газа часто учитывается в рамках многогруппового приближения. Во многих задачах этот подход является непосильным для современных ЭВМ, если от него требуется приемлемая точность. Немногим лучше в этом смысле моментные методы [76] и упомянутая в [76] их многогрупповая модификация. Решающий шаг в достижении точного учета спектральности сделан в [77, 78]. Выполненная в этих публикациях моментная обработка уравнения переноса и коэффициента поглощения вместе со всеми его спектральными линиями по величине коэффициента поглощения делает аккуратный учет спектральности реальным. Использован этот метод, к сожалению, только в [77, 78], а отпугивает он одной лишь подготовительной работой для своего применения.

Перечисленные работы [68–78] дают все составные части расчета лучистого теплоподвода. Его найденное распределение позволяет продвинуться на шаг по времени или на шаг итерации, используя для интегрирования уравнений газовой динамики известные [79] или специально разработанные (например, [80–82]) методы. При расчете течений неизвестной заранее структуры успешно используется метод С.К. Годунова.

Среди решенных задач динамики излучающего газа, многие, как это выясняется позже, открывают подходы к расчету процессов в лазерном двигателе. Нестационарное осесимметрич-

ное течение воздуха в прозрачном цилиндрическом стакане под действием лазерного излучения, пронизывающего часть его объема при первоначально затененном слое воздуха у дна, рассчитано в [83]. Стационарное течение воздуха в трубе с известными данными на входе в нее, известной температурой ее стенок и данными на выходе изучено в [84]. Течения воздуха между двумя коаксиальными трубами, из которых внешняя прозрачна, а внутренняя имеет участки различной температуры, рассмотрены в [85]. В зависимости от этих температур либо течение воздуха остается всюду дозвуковым, либо в области течения образуется сверхзвуковая зона, либо дозвуковое течение целиком переходит в сверхзвуковое (цилиндрическое сопло). Из рассчитанных течений интересна “вспышка” газа под действием параллельного излучения, сфокусированного параболическим зеркалом [86]. Действующая на него сила позволяет использовать его в комбинации с лазером как импульсный двигатель.

Детально изученный в цикле работ, подытоженных в [87–89], лазерный двигатель представляет собой конический алюминиевый стакан с плоским дном, укрепленный на летающем объекте и получающий с Земли или с другого объекта пучок лазерного излучения, направленный в дно стакана. Материал дна испаряется, его пары, в свою очередь, поглощают лазерное излучение и излучение окружающих паров и сами спектрально излучают энергию, к испарению подключаются боковые стенки стакана, а в результате всех этих процессов возникает реактивная сила, действующая на стакан. Привлекает в этой идее экономия энергии, которая в настоящее время затрачивается на работу многоступенчатых ракетных систем. В процессе исследований в зависимости от параметров лазерного двигателя получены режимы его работы как с колебаниями реактивной силы во времени, так и с плавным ее изменением.

Еще одной сложной проблемой динамики излучающего газа является исследование движения космических аппаратов в атмосфере планет, которое описывается тремя связанными системами уравнений: динамики полета, теплопроводности и радиационной газовой динамики [90]. Модель учитывает прогрев и испарение трехслойного теплозащитного покрытия и позволяет определить влияние потери массы аппарата на траекторию полета. Исследован вход двух космических аппаратов с разной формой лобовой поверхности (конической формой со сферическим затуплением и сегментальной формой) и с одинаковым радиусом миделевого сечения в атмосферу Венеры. Показано, что по теплозащитным свойствам первая форма предпочтительней второй.

Уравнение переноса излучения близко к уравнению Больцмана, одному из самых сложных уравнений математической физики, которое описывает изменение функции распределения частиц газа в обычном и скоростном пространствах. Методы его решения развивались в работе [91].

Исследование и решение обратных задач теории переноса излучения, опубликованные в [92–95] и указанных в этих публикациях работах, стали значительным вкладом в создание методов определения коэффициента поглощения и функции высвечивания в зависимости от термодинамических параметров и частоты, а также определения интенсивности излучения в зависимости от координат и направления по падающему на некоторый объем газа и выходящему из него излучению. С этой целью подбираются такие условия проведения эксперимента, которые позволяют по его результатам наиболее просто определить указанные зависимости. В результате рассматриваются стационарные плоскопараллельные одномерные задачи, задачи с осевой симметрией и трехмерные задачи для конечного цилиндра, конуса и сферы. Устанавливаются существование и единственность решения задач определения перечисленных величин или их части в зависимости от возможностей, предоставляемых изучаемыми процессами и их геометрией. Методы решения таких задач разработаны на основе сведения их к интегральным уравнениям типа Вольтерра. Вместе с тем существованию и единственности совместного решения уравнений энергии и переноса излучения посвящен ряд публикаций и среди них [96].

**Исследование взаимодействия внешнего излучения с плазмой** связано с лазерным термоядерным синтезом, воздействием мощного радиоизлучения на ионосферу и космическую плазму, нагревом плазмы в магнитных ловушках и пр. Первый цикл работ (см. [97] и предшествующие работы) был ограничен рамками теории слабой плазменной турбулентности. Были изучены интегродифференциальные и аппроксимирующие их дифференциальные модели плазменной турбулентности и обнаружено новое свойство процесса перекачки энергии по



спектру, характеризующееся наличием узких нерегулярно двигающихся пакетов волн. Полученные результаты были применены для исследования ряда физических процессов в лазерной и ионосферной плазме. В работе [98] был проведен анализ совместной эволюции функции распределения частиц и турбулентных плазменных шумов в замагниченной плазме. В двух работах (см. [99]) исследовалось взаимодействие очень мощного излучения с плазмой, которая описывалась системой уравнений Власова для электронов и ионов. В серии работ (см. [100]) разработана более точная самосогласованная модель процессов, происходящих в области максимального поглощения электромагнитного поля, при помощи которой исследован вопрос о перераспределении поглощаемой плазмой энергии между тепловыми и быстрыми электронами. Установлен важный для диагностики плазмы эффект сверхотражения лазерного излучения от плазмы, который сопровождается всплеском излучения на второй гармонике частоты падающего излучения, что согласуется с экспериментальными данными. Моделированию самофокусировки рентгеновского излучения в плазме посвящена работа [101].

**Объемные газовые разряды.** В [102] суммированы результаты работ по теории несамостоятельных объемных разрядов в молекулярных газах, контролируемых электронным пучком (так называемые электроионизационные разряды, служащие для накачки мощных газовых лазеров). Здесь же теоретически предсказана возможность существования в благородных газах двух новых типов объемных разрядов высокого давления: самоподдерживающегося разряда с фотоионизацией примеси и разряда с фотоионизацией электронновозбужденных атомов. В [103] анализируется возможность использования в качестве источника внешней ионизации тонких слоев  $\alpha$ -радиоактивных препаратов, нанесенных на электроды разряда. Расчетам неравновесного переноса электронов в газоразрядной плазме посвящена работа [104], в которой предложены уравнения для энергетического спектра электронов, равномерно пригодные как для случая околоравновесного процесса переноса, так и в существенно неравновесных областях.

**Мощные газовые лазеры и транспортировка излучения через атмосферу.** Первые работы в этом направлении [105, 106] были посвящены поиску перспективных схем мощных технологических газовых лазерных установок длительного действия с электроионизационным способом возбуждения активной среды. В [107] проведены исследования ограничений, налагаемых так называемым тепловым самовоздействием на возможность транспортировки излучения мощного  $\text{CO}_2$ -лазера с поверхности Земли за пределы атмосферы. В [108] с целью отстройки частоты генерации  $\text{CO}_2$ -лазера от частоты поглощения природной молекулы  $\text{CO}_2$  экспериментально и теоретически исследованы особенности генерации непрерывного проточного электроионизационного лазера на бинарной смеси природных ( $^{12}\text{C}^{16}\text{O}_2$ ) и изотопомодифицированных ( $^{13}\text{C}^{16}\text{O}_2$ ) молекул двуокиси углерода. В [109–112] теоретически и экспериментально исследовано влияние различных механизмов (тепловое самовоздействие, акустические возмущения) на предельные яркостные характеристики излучения импульсных и импульсно-периодических  $\text{CO}_2$ -лазеров.

**Полупроводниковые структуры.** В серии работ (см., например, [113, 114]) на основе сочетания метода асимптотических разложений, введения новых неизвестных функций — квазипотенциалов и итерационных численных методов развиты эффективные методики расчета так называемой фундаментальной системы уравнений полупроводниковой плазмы — уравнений Шокли, включающих нестационарные уравнения переноса зарядов в дрейфово-диффузионном приближении и уравнения Пуассона для потенциала электрического поля. Основная трудность численного решения этой системы связана с малостью коэффициента при старших производных в уравнении Пуассона, в результате чего в окрестности переходов и некоторых внешних границ образуются подобласти, в которых искомые функции имеют большие градиенты.

В дальнейшем численные методы расчета двумерных полупроводниковых структур различного типа, нестационарных процессов в компенсированных полупроводниках и процессов в полупроводниковых фотопреобразователях развивались, например, в [115–118]. Работа [119] посвящена итерационному методу расчета уравнений теплового баланса в полупроводниковых термоохладителях сложной структуры, в том числе и с использованием параллельных вычислительных систем.

**Пневмомеханические системы и системы трубопроводов.** Итогом разработки математических моделей и методов расчета переходных процессов в пневматических системах управ-

ления, состоящих из разветвленной системы трубопроводов и различных исполнительных механизмов, стала книга [120] и пакет прикладных программ, реализующих на ЭВМ эти модели и методы [121]. Эти подходы в дальнейшем были применены для расчетов нестационарных течений насыщенного водяного пара в трубопроводах АЭС [122]. В [123] рассчитаны характеристики штатных и нештатных газодинамических режимов работы подводного газопровода через Черное море (проект “Голубой поток”) и оценены возможные величины выброса природного газа при аварийном разрушении трубопровода.

**Задачи гидромеханики, решаемые с использованием “естественных переменных”.** В независимых переменных (функция тока) — (ортогональное дополнение к функции тока) уравнения стационарной газовой динамики разделяются на гиперболическую и эллиптическую подсистемы, которые могут решаться итерационными численными методами, отвечающими природе этих подсистем. В этих “естественных переменных” [124] уравнения удобны для численного интегрирования в случае до-, транс- и сверхзвуковых двумерных течений, в том числе и для течений вязкого газа [125–130]. В частности, был решен ряд обратных задач теории сопел, в которых задаются некоторые свойства течения, например объемный теплоподвод, а форма стенок, обеспечивающих эти свойства, определяется в процессе расчетов. Эти переменные удобны также и для расчета закрученных движений тяжелой жидкости со свободной поверхностью [131], изученных в связи с моделированием перспективной жидкометаллической мишени для управляемого протонным пучком источника нейтронов (см. ссылку в [131]).

**“Промышленная гидромеханика”.** К данному направлению можно отнести работу [132] и предшествующие работы по численному моделированию течений рабочего тела в газовых турбинах. Результатом этих работ явилось создание математической модели и реализующего ее комплекса программ, в которых турбулентный двухкомпонентный газовый поток, включающий продукты сгорания углеводородного топлива и охлаждающий воздух, выдуваемый с поверхности лопаток, корпуса и втулки многоступенчатой турбины, описывается на основе осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса и двухпараметрической модели турбулентности. В результате проведенных исследований была создана гибкая и надежная вычислительная технология, элементы которой описаны в [133]. С помощью этой технологии были проведены работы по моделированию параметров взаимодействующих течений внутри и вне современных трехмерных авиационных эжекторных сопел [134]. Данная технология применялась также, для моделирования двумерного и трехмерного обтекания турбулентным потоком гидротехнических сооружений, размещенных на океаническом шельфе [135, 136].

**Исследование ударно-волновых течений конденсированных сред** началось с моделирования одного эксперимента по ударному сжатию дейтерия в конических мишенях с помощью взрывных устройств, в котором был получен значительный нейтронный выход при скорости ударника намного меньшей, чем в других аналогичных экспериментах. Было показано [137], что в эксперименте возникает кольцевая кумулятивная струя алюминия, которая, схлопываясь на оси симметрии, порождает высокоскоростные струи дейтерия. Рассчитанный нейтронный выход оказался незначительным, что послужило стимулом для расчета вязкого нагрева дейтерия. Расчет спонтанного электромагнитного поля в дейтериевой плазме и проникновения поля в мишень показал, что схлопывание кольцевой кумулятивной струи увеличивает величину токов Фуко в мишени примерно в 10 раз [138]. Измеряя эти токи можно диагностировать факт схлопывания струи. Моделирование эксперимента с тонкой фольгой в качестве высокоскоростного ударника [139] показало, что падение нейтронного выхода при увеличении угла раствора конуса объясняется разрушением струи, вызванным появлением в ней кипящей жидкости. В той же работе показана устойчивость струи к осесимметричным возмущениям границы раздела. Моделирование эксперимента по лазерному сжатию дейтерия в конических мишенях [140] показало, что измеренное значение нейтронного выхода объясняется схлопыванием головной и первой отраженной ударных волн.

Неустойчивость границы раздела различных сред после выхода на нее двух последовательных ударных волн исследована в [141]. Показано, что если к моменту выхода на границу второй ударной волны развитие возмущений находится на нелинейной стадии, то в отличие от линейной стадии изменение скорости роста амплитуды слабо зависит от длины волны начального возмущения. Предложена формула, позволяющая определять воздействие второй ударной

волны на скорость роста амплитуды, и показана ее хорошая точность как для синусоидального, так и для негладкого начального возмущения. Продемонстрирована возможность определять параметры второй ударной волны, “замораживающей” неустойчивость.

В работе [142] исследовано бесструйное сжатие пластины на клине сильной ударной волной. Построено и проверено расчетами приближенное решение с присоединенной ударной волной, учитывающее фазовый состав материала пластины в волне разгрузки. Обнаружено значительное увеличение температуры за фронтом присоединенной волны по сравнению с температурой за фронтом сжимающей волны. Показана возможность инициирования термоядерной реакции в пластине из дейтериевого льда.

В [143] исследована задача о нагреве сжимаемой жидкости постоянным потоком тепла. Обнаружено, что начиная с некоторого момента времени давление всюду за ударной волной мало отличается от постоянного значения. Получены и проверены расчетами приближенные формулы, из которых следует независимость давления от коэффициента теплопроводности и некоторые закономерности зависимости давления от величины потока тепла.

Еще одно направление связано с ударным сжатием графита в конических твердотельных мишенях. В [144] исследованы все стадии процесса от кумулятивного эффекта на оси симметрии мишени до разгрузки образца, вызванной приходом волны разрежения от тыльной поверхности ударника, с учетом кинетики превращения графита в алмаз и явления откола. Последующий учет начальной пористости графита дал неожиданный результат [145], противоположный случаю плоских ударных волн. При уменьшении начальной плотности графита значительно повышалось создаваемое в нем давление.

Решение задач стимулировало развитие методов. Первой проблемой было построение криволинейных сеток. По мере движения струи расчетная область искривлялась настолько, что имевшиеся в то время методы давали сетки с самопересекающимися ячейками. Совместно с С.А. Иваненко, занимавшимся построением сеток в другом отделе ВЦ, и отталкиваясь от его ранней работы был построен метод, который на каждой итерации гарантировал выпуклость всех ячеек сетки (за естественным исключением тех угловых ячеек, невыпуклость которых определена граничными узлами) практически при любом искривлении непересекающихся границ области. Десятилетний опыт использования метода подытожен в [146]. Дальнейшее развитие метода в применении к рассматриваемым задачам обобщено в [147]. Итерации на подмножествах узлов уменьшили время построения сеток с большим числом узлов. Объединение с квазиоднородной сеткой, имеющей заданный закон расстановки узлов, улучшило сетку вблизи подвижной границы [146].

Расчеты на некоторых сетках обнаружили потерю точности консервативной схемы. Было найдено такое преобразование широкого класса консервативных схем, которое обеспечивало отсутствие как свойственной неконсервативным схемам методической ошибки сквозного расчета ударных волн, так и обнаруженного недостатка консервативных схем [148].

Развитая методика использовала расщепление уравнений газовой динамики на лагранжевый этап и этап пересчета искомых функций с лагранжевой сетки на заданную. В [149] показано, что разностные схемы этого расщепления более устойчивы и более монотонны по сравнению с аналогичными схемами другого известного расщепления.

Для расчета вязкого нагрева дейтерия был нужен метод расчета дозвукового течения в узком погранслое при сильных ударных волнах в основной части течения. Трудность заключалась в том, что схемы переменных направлений приводят к значительной потере точности при расчете нестационарных дозвуковых течений с большим шагом по времени, нарушающим условие Куранта, а неявные квазимоноотонные схемы без расщепления по направлениям очень неэкономичны. Составная схема [150] переходит в неявную схему в погранслое, в явную квазимоноотонную схему в основной части течения, а плавность перехода от одной схемы к другой определяется плавностью перехода от мелкой сетки к крупной. Отсутствие требования квазимоноотонности позволяет построить неявную схему с системой алгебраических уравнений относительно значений только одной скалярной функции. Кроме того, число уравнений примерно равно числу узлов сетки в погранслое, что значительно меньше общего числа узлов. Эффективные составные схемы для параболических уравнений, возникающих при использовании расщепления по физическим процессам на этапах учета вязкости и теплопроводности,

объединяют схему переменных направлений, “работающую” в основной части течения, и чисто невязную схему, “работающую” в погранслое.

Варианты задачи о распаде разрыва в применении к схеме С.К. Годунова анализируются в [151]. Показано, в частности, что схемы с точным решением задачи о распаде в отличие от схем с линейным приближением задачи имеют на сильных ударных волнах квадратичную схемную вязкость. Построен алгоритм для уравнения состояния в табличной форме, на основе которого создан метод подавления вычислительного энтропийного следа.

**Другие численные методы.** В этом разделе кратко представлены исследования, выходящие за рамки рассмотренных выше конкретных направлений.

Попутным результатом исследований по вариационным задачам стали новые формулы быстрого автоматического дифференцирования для вычисления матрицы вторых производных сложных функций [152]. Неожиданным направлением оказалось использование решений уравнений математической физики для построения интерполяционных кривых [153]. Рекуррентная формула для интегралов от произведений двух ортогональных полиномов на произвольную функцию [154] появилась в результате работы над моментным методом расчета излучения.

Разработка методов построения регулярных сеток, адаптирующихся к решению задачи, была начата в ВЦ РАН С.А. Иваненко в начале 90-х гг. В отделе механики сплошных сред это направление начало развиваться совместно с С.А. Иваненко позже в применении к двумерным газодинамическим течениям с ударными волнами. Особенность построения адаптивных сеток для таких задач заключается в том, что функция, управляющая расстановкой узлов, близка к разрывной. Так как возможность уточнять решения уравнений газовой динамики с помощью адаптивной сетки далеко не очевидна, создание методики началось с решения тестовой задачи об отраженной ударной волне в канале и надежного заключения о существенном уменьшении нормы погрешности при переходе от равномерной сетки к адаптивной с тем же числом узлов. В настоящее время методика успешно применена для плоских течений с детонационными волнами и для задачи о взрыве. Цикл работ опубликован в отечественных и зарубежных журналах (см., например, [155, 156]), в материалах многих конференций.

**Течения вязкой несжимаемой жидкости.** Уравнения стационарных течений в плоском случае преобразованы к виду, переводящему область пограничного слоя в область регулярного решения так, что область регулярного решения может перейти в область пограничного слоя [1].

Уравнение Навье–Стокса для функции тока также в стационарном случае приведено в [157] к однородным формам в действительных и в комплексных переменных. В этих формах уравнение представляет собой равную нулю сумму членов, в каждом из которых числовой коэффициент имеет четыре сомножителя, а ими являются либо новая искомая функция, либо производные от нее, причем дифференцирование в каждое слагаемое входит четыре раза.

Уравнения нестационарных плоскопараллельных изобарических течений в [1] сведены к уравнению теплопроводности. Там же получено стационарное решение типа простой волны, когда две составляющие вектора скорости являются функциями третьей.

Некоторые результаты получены для течений, линии тока которых не зависят от числа Рейнольдса. В плоском случае найдено вращательное движение вокруг эллипса с прилипанием к нему, течение, одна из линий тока которого имеет точку возврата, и другие [1]. В одном частном случае вся плоскость течения заполнена жидкостью с положительной горизонтальной составляющей вектора скорости при единственной точке торможения, остановка потока в которой вызвана условиями в окружающем потоке. Среди осесимметричных течений этого типа получены впервые кольца различных поперечных сечений и другие вихревые образования, аналитическое описание которых содержится в статьях У. Крудели [158]. Одно из решений описывает бесконечную периодическую цепочку соосных вихрей типа Хилла.

В плоскопараллельных течениях приходящая на обтекаемую границу линия тока (или отходящая от нее) может образовывать с ней любой угол. Этот факт установлен в [159]. Исследование течений в окрестности точки излома обтекаемого контура (с углом меньшим  $\pi$  со стороны потока) показало, что в окрестности излома образуется бесконечная система вихрей, уменьшающихся по направлению к точке излома [160]. Получено явное представление некоторых отрывных плоскопараллельных течений около плоских границ [161]. Среди осесимметричных течений У. Крудели исследовал случай квадратичной зависимости завихренности от

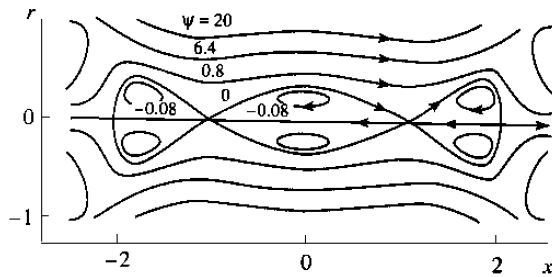


Рис. 9. Три попарно сомкнувшихся вихревых образования (точное решение)

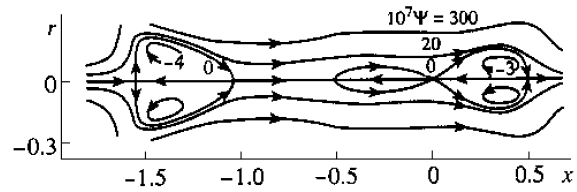


Рис. 10. Три вихревых образования (решение в виде степенных рядов)

радиуса цилиндрических координат [158]. Уравнение для функции тока при этом было решено разделением переменных. В [162] это уравнение решается подстановкой ряда по степеням радиуса  $r$  с неизвестными коэффициентами, зависящими от осевой координаты  $x$ . Если  $f(x)$  — полином, то представляющий решение ряд обрывается и приводит к явному решению. В качестве примеров приведены течения с различными комбинациями соосных вихрей типа Хилла (рис. 9). В общем случае при определенных условиях доказана сходимость полученного ряда при конечных значениях координат и то, что он дает решение рассмотренной задачи Коши. При отказе от частного представления завихренности дано обоснование решения задачи Коши и приведен пример (рис. 10) системы вихрей типа Хилла [163].

Описываемое уравнениями Навье–Стокса обтекание сферы с прилипанием на ней дано в [164]. Некоторые классы точных решений можно найти в [165].

Разнообразные вязкие течения помимо рассмотренных в предыдущих разделах исследовались с использованием численных методов в работах [166–173].

При нулевом числе Рейнольдса решения проявляют некоторые характерные особенности течений в общем случае. Обтекание пластинок можно найти в [1], а течения в каналах с отрывными образованиями — в [174].

**Асимптотические методы в динамике вязкой жидкости и в теории кинетических процессов.** Успехи теории пограничного слоя [175, 176] оказались столь большими, что ее идеи и методы проникли в различные области механики и математической физики. Развитие этих идей вначале в лаборатории теории процессов переноса, а затем в секторе асимптотических методов, входившим в разное время в отделы механики и механики сплошных сред, позволило рассмотреть ситуацию неклассического пограничного слоя, что дает ключ к изучению таких явлений, как отрыв, гидродинамическая неустойчивость и начальные стадии ламинарно-турбулентного перехода. Целый ряд совершенно новых представлений получен при исследовании так называемого свободного взаимодействия в вязких трансзвуковых течениях, для описания которых предложены различные варианты нелинейной теории возмущений.

В широком смысле слова сама теория движений вязкой жидкости и газа является асимптотической, так как система уравнений Навье–Стокса есть асимптотический предел еще более сложного интегро-дифференциального уравнения Больцмана, когда к нулю стремится число Кнудсена  $Kn$ . Вместе с тем в ряде ситуаций возможен асимптотический анализ решений кинетического уравнения Больцмана, когда  $Kn$  не является малым параметром.

Круг проблем неклассической теории пограничного слоя, который поддается исследованию посредством современных асимптотических методов, обрисован в монографии [177]. Ряд интересных и важных вопросов в дальнейшем изложении не затрагивается, хотя их разработка может быть восстановлена по представленным ранее обзорам [178, 179].

**Асимптотические решения кинетических уравнений.** Выполненное в [180] сравнение структуры ударной волны в нейтральном газе на основе уравнений Навье–Стокса, уравнения Больцмана и некоторых модельных кинетических уравнений потребовало анализа асимптотической природы уравнений сплошной среды и установления связи между числом Кнудсена  $Kn$  при  $Kn \rightarrow 0$  и числом Рейнольдса  $Re$  при  $Re \rightarrow \infty$ .

Схема внешних и внутренних асимптотических разложений применена к решению кинетического уравнения в задаче о разлете плоского слоя разреженного газа в вакуум [181].

Качественный результат асимптотического анализа для  $\text{Kn} \rightarrow 0$  оказался достаточно неожиданным: предельное поведение температуры газа  $T$  на временах  $t \rightarrow \infty$  описывается не континуальным законом  $T \sim t^{-2/3}$ , а подчиняется асимптотике  $T \sim [\ln t]^{1/(\nu-1)}$ , где  $\nu$  — постоянная в соотношении  $\mu = T^\nu$  для коэффициента вязкости  $\mu$ .

Существование областей, где уравнения Эйлера или Навье-Стокса непригодны (как бы ни было мало число  $\text{Kn}$ ), составляет характеристическое свойство класса задач о разлете газового облака или истечении струи в вакуум [181, 182] с точки зрения кинетического описания названных процессов и дает пример ситуаций, требующих разработки метода нерегулярных возмущений при  $\text{Kn} \rightarrow 0$ .

Аналогично при стационарном истечении разреженного газа от сферического источника в затопленное пространство [183] изменение температуры среды перестраивает структуру течения и положение сферической ударной волны на расстояниях  $r \sim \text{Kn}^{-1}$ , следовательно, в случае  $\text{Kn} \rightarrow 0$  описание внешней области  $r \rightarrow \infty$  (где движение медленное) диктует необходимость привлечения асимптотических оценок для вязких напряжений и тепловых потоков.

Задача об испарении вещества с твердой поверхности принципиально не может быть решена в рамках уравнений сплошной среды вследствие существования тонкого слоя Кнудсена при сколь угодно малых числах  $\text{Kn}$ . Решение в слое Кнудсена требует привлечения кинетического уравнения и устанавливает асимптотические граничные условия для макропараметров на внешней границе указанного слоя [184, 185]. Те же эффекты (в усложненной форме) проявляются при наличии внешнего гравитационного поля [186, 187].

Заметим, что во всех упомянутых выше задачах содержательные результаты получаются и в противоположном предельном случае  $\text{Kn} \rightarrow \infty$  (свободномолекулярное приближение). В качестве примеров применения асимптотических методов в теории динамических систем служат рассмотренные в [188] колебания спутника-зонда, буксируемого на нерастяжимом тросе тяжелым спутником-носителем. Оказалось, что тип особых точек (положений равновесия системы) и их число меняются при учете аэродинамических эффектов, а именно, воздействия на зонд разреженной атмосферы.

**Асимптотический подход в теории гидродинамической устойчивости.** Классическая задача об устойчивости пограничного слоя уже в своей формулировке отражает асимптотическую природу объекта изучения, ибо сам пограничный слой существует для чисел Рейнольдса  $\text{Re} \rightarrow \infty$ . Возможность распространения основных представлений асимптотической теории (при  $\text{Re} \rightarrow \infty$ ) свободного взаимодействия пограничного слоя с внешним потоком на задачи устойчивости продемонстрирована в цикле работ (см., например, [189–191]). Применение многоярусных асимптотических конструкций позволило не только уточнить поведение нейтральных кривых и свойства собственных функций уравнения Орра–Зоммерфельда [192, 177], но и установить асимптотическую структуру флуктуационных полей и указать физические механизмы неустойчивости [193–195].

Тот факт, что внутренние волны в пограничном слое с самоиндуцированным давлением представляют собой асимптотику волн Толлмина–Шлихтинга (собственных решений уравнения Орра–Зоммерфельда) в пределе  $\text{Re} \rightarrow \infty$ , послужил руководящим соображением для асимптотического описания таких эффектов [177], как генерация неустойчивых колебаний звуком, влияние сжимаемости и теплопроводности газа на форму нейтральных кривых, роль продольных микробороздок (риблет) на поверхности обтекаемого тела с точки зрения управления ламинарно-турбулентным переходом.

Дополнительный анализ исходной системы уравнений Навье–Стокса в трансзвуковом диапазоне скоростей [196] приводит к асимптотической теории, пригодной к предсказанию потери устойчивости пограничного слоя (в окрестности нижней ветви нейтральной кривой). Неустойчивость пограничного слоя трансзвукового потока по отношению к возмущениям из окрестности верхней ветви нейтральной кривой рассмотрена в [177]. Примеры применения асимптотического анализа устойчивости в трансзвуковом диапазоне даны для осесимметричной геометрии [197] и эластичной поверхности, ограничивающей течение [198].

Разделение поля возмущенного потока на ряд расположенных друг над другом подслоев и последующее асимптотическое сращивание решений в каждом из них оказалось адекватным математическим приемом для исследования устойчивости не только течений в пограничных

слоях, но и внутренних течений в каналах и трубах [199–202]. Элементы новизны по сравнению с известными результатами вносит выполненное в [203] исследование устойчивости течения Куэтта–Пуазейля, в котором обнаружено существование пяти различных ветвей нейтральной кривой.

Анализ пульсаций в пристеночной струе, ограниченной снизу плоским экраном, может базироваться на уравнениях Прандтля с включенным в них самоиндуцированным давлением. Данное обстоятельство, являющееся еще одной иллюстрацией эффективности специальных асимптотических методов в теории устойчивости, послужило отправной точкой в изучении свойств дисперсионного соотношения и спектра собственных функций [204] для пристеночной струи, среди которых имеются моды с нарастающей во времени амплитудой.

**Исследование различных механизмов передачи возмущений вверх и вниз по потоку в нелинейных задачах теории свободного взаимодействия пограничного слоя.** Возникновение зоны локального отрыва в области выше по потоку от точки падения на пограничный слой ударной волны получает свое объяснение на основе концепции самоиндуцированного давления и поддается количественному описанию в рамках нелинейных уравнений теории свободного взаимодействия [205, 177]. В соответствии с этой теорией поле течения разделяется на три подслоя (палубы), причем отрывной пузырь располагается в самом нижнем из них. С увеличением амплитуды внешнего воздействия (ударной волны или излома стенки) рециркуляционная зона вытягивается вверх по потоку. Это послужило наводящим соображением для построения модифицированной нелинейной теории возмущений [206] для флуктуаций сравнительно большой амплитуды с иными пространственно-временными масштабами. В модифицированной теории возмущенное поле скоростей разделяется на четыре палубы, а построение картины течения сводится либо к уравнению Бюргерса [207] для чисел Маха внешнего потока  $M_\infty > 1$ , либо к интегро-дифференциальному уравнению Бенджамина-Оно [208] для  $M_\infty < 1$ . Для пристеночной струи несжимаемой жидкости в [207] указан класс нелинейных возмущений, эволюция которых подчиняется уравнению Кортевега–де Вриза.

Аналогичная теория нелинейных возмущений в применении к пограничному слою в трансзвуковом потоке [209] приводит к интегро-дифференциальному управляющему уравнению относительно некоторой функции  $A(t, x)$ , характеризующей смещение линий тока относительно их невозмущенного положения.

Трансзвуковой параметр  $K_\infty = O(1)$  характеризует близость числа Маха к единице в терминах другого малого параметра  $\delta \rightarrow 0$  следующим образом:  $M_\infty^2 - 1 = \delta K_\infty$ . При выходе из трансзвукового диапазона  $K_\infty = O(1)$  в дозвуковую область ( $K_\infty \rightarrow -\infty$ ) уравнение переходит в уравнение Бенджамина-Оно, при выходе в сверхзвуковую область ( $K_\infty \rightarrow +\infty$ ) — в уравнение Бюргерса.

Все упомянутые нелинейные эволюционные уравнения содержат волновые решения, описывающие распространение возмущений вверх по потоку. Асимптотическая теория этого явления на примере пограничного слоя в сверхзвуковом потоке предложена в [210].

Обобщение теории нелинейных возмущений на трехмерный случай приводит к двумерным аналогам одномерных эволюционных уравнений [211, 212].

**Динамика солитонов. Асимптотическая теория трансзвуковых течений и уравнение Линя-Рейснера-Цзяня.** Рассеяние солитона на солитоне послужило предметом исследований в [211, 212]. Приведены соображения о связи упругости столкновений солитонов с интегрируемостью нелинейных эволюционных уравнений методом обратной задачи рассеяния. Картина взаимодействия солитонов прослежена для четырех двумерных солитоносодержащих уравнений, в том числе для уравнения Кадомцева–Петвиашвили.

Предложенные к настоящему времени различные модели свободного взаимодействия пограничного слоя с внешним трансзвуковым потоком в качестве одной из своих модификаций включают асимптотическую схему [213], устанавливающую возникновение отрыва и образование локальных сверхзвуковых зон, замыкаемых ударными волнами. Последнее обстоятельство проиллюстрировано в [214, 215] с применением специально разработанных численных процедур для решения существенно нелинейных задач. Система уравнений, которой подчиняется трансзвуковой поток в режиме взаимодействия, содержит уравнение Линя-Рейснера-Цзяня (граничные условия для которого даются асимптотикой решения уравнений Прандтля на

внешней границе пограничного слоя). Поскольку уравнение Линя-Рейснера-Цзяня описывает внешнюю область потенциального течения, решения данного уравнения [216] представляют самостоятельный интерес.

**Моделирование климата и биосферы.** Сектор моделирования климата отдела механики сплошных сред был образован в конце 70-х гг. по инициативе академика Н.Н. Моисеева. Его задачей было математическое моделирование глобального климата и выявление связи происходящих изменений климата с экономической деятельностью. С конца 90-х гг. к задачам сектора добавились задачи прогнозирования глобальных экологических процессов на фоне экономической деятельности и определение их связи с факторами климата.

Основой гидродинамических моделей глобального климата являются модели общей циркуляции атмосферы (ОЦА). Они основаны на трехмерных уравнениях гидротермодинамики (так называемых примитивных уравнениях), описывающих крупномасштабные течения во влажной атмосфере на вращающейся Земле с реальной топографией. Важным элементом является описание процессов вертикального переноса солнечной и тепловой радиации в атмосфере и гидрологического цикла (конвекция, облачность, осадки), процессов на подстилающей поверхности. ВЦ РАН был в числе первых коллективов, реализовавших в начале восьмидесятых годов эффективно работающую модель ОЦА, модель морского льда и модель деятельного (верхнего) слоя океана, составляющих глобальную климатическую модель (модель климата ВЦ РАН), позволяющую вести климатические расчеты на десятки лет [217, 218].

В процессе работ пройдены этапы от расчетов на очень грубой сетке и среднегодового и среднесуточного режимов до приемлемых значений размеров расчетной сетки, учета суточного хода, увеличения числа вертикальных слоев, использования параллельных суперкомпьютеров [219]. Созданы и реализованы современные модели общей циркуляции океана в изопикнических координатах [220], растительности на подстилающей поверхности [221], ведутся работы по реализации модели планетарного пограничного слоя. Разработана модель эволюции морского льда и проведены различные численные эксперименты по изучению характеристик арктического морского льда [222, 223].

Модель климата ВЦ РАН активно используется для расчетов атмосферных и климатических процессов на Земле. Проведены расчеты по воспроизведению современного климата [221, 224], многочисленные эксперименты по оценке антропогенных и естественных изменений климата (последствия ядерной войны, увеличение концентрации углекислого газа, крупных вулканических извержений, изменений подстилающей поверхности и др.) [217, 221, 222, 225, 226].

На основе модели климата в первой половине 80-х гг. были сделаны ставшие всемирно известными расчеты климатических последствий крупномасштабной ядерной войны — “ядерной зимы” [218, 225, 227, 228]. Также были разработаны экологические модели и сделаны прогнозы экологических и демографических последствий ядерной зимы, в частности таких ее факторов, как глобальное похолодание и увеличение ультрафиолетового излучения [229]. Эти работы имеют не только научный интерес, но и получили широкий общественный и политический отклик и повлияли на изменение военных доктрин [230].

Первые расчеты климатических последствий ядерной войны, проведенные В.В. Александровым и его коллегами, работавшими под руководством Н.Н. Моисеева, дают географическое распределение всех метеорологических характеристик в зависимости от времени, прошедшего с момента ядерного конфликта [225]. Сходные результаты по согласованному сценарию развития ядерной войны были одновременно получены американскими учеными. Главным климатическим эффектом ядерной войны, независимо от ее сценария, будет резкое, исключительно сильное и длительное охлаждение воздуха над континентами — “ядерная зима”. Температура за короткий срок понижается приблизительно на  $15^{\circ}$ – $40^{\circ}$ С в разных регионах [225, 227]. Особенно тяжелые последствия следует ожидать в летний период, когда на обширных территориях северного полушария температура упадет ниже точки замерзания воды. Иными словами, все то живое, что не сгорит во время ядерных пожаров, вымерзнет. “Ядерная зима” повлечет за собой лавину губительных эффектов. Возникнут существенные температурные контрасты между сушей и Мировым океаном, поскольку океан обладает огромной термической инерцией, и воздух над ним практически не будет охлаждаться. С другой стороны, изменения в атмосфере подавят



конвективные процессы, и над погруженными в ночь, скованными холодом континентами разразятся жестокие засухи.

Разработана и адаптирована для применения в климатической модели модель эволюции морского льда на крупной и мелкой сетке в арктическом регионе. Проведены совместные (атмосфера – океан – лед) численные эксперименты по моделированию климата и ледового режима арктических морей России для различных условий [222]. Проведен анализ многолетней естественной изменчивости модельного ледового покрова, а также анализ его чувствительности к основным характеристикам модели [223].

Разработан биотический блок климатической модели, представленный биогеографической моделью, основанной на физиологическом подходе к свойствам растительности. Найдено, что в результате потепления климата происходит аридизация континентов Южного полушария, а теплолюбивые биомы Северного полушария расширяют свои границы [221].

При глобальных и региональных экологических исследованиях была разработана система математических моделей для прогнозирования воздействия хозяйственной деятельности на биосферу, ее природные системы и климат [231, 232]. Система моделей биосферных процессов содержит точечные и пространственные модели биогеохимических циклов углерода и азота в системе “атмосфера – растения суши – почва” и “атмосфера – океан”. Пространственное разрешение моделей составляет  $0,5 \times 0,5$  и  $4 \times 5$  градусов географической сетки. Связь с климатом реализуется через механизм парникового эффекта двуокиси углерода. Получены долгосрочные прогнозы изменения количества двуокиси углерода в атмосфере и климата, а также экологических процессов в результате различных сценариев экономической деятельности: выброса двуокиси углерода в атмосферу при сжигании органических топлив (нефть, газ, каменный уголь), вырубки лесов, эрозии почв. Рассчитан баланс промышленных выбросов  $\text{CO}_2$  и поглощения  $\text{CO}_2$  странами мира и регионами [232, 233], в том числе субъектами РФ [234]. Сделаны расчеты последствий ограничения выбросов  $\text{CO}_2$  в атмосферу — выполнения Киотского протокола к Рамочной конвенции ООН об изменении климата, а также его частичного выполнения [232, 233]. Разработана математическая трактовка выполнения принципа Ле-Шателье в биосфере и определена способность экосистем суши и океана компенсировать антропогенные воздействия на биосферу [235]. В пространственной модели системы атмосфера-океан рассчитана способность различных океанов и их частей поглощать выбросы  $\text{CO}_2$ , а также оценена роль биоты океана в поглощении выбросов [236, 237].

Разработаны модели и сделаны оценки значимости цикла метана на планете и оценена опасность роста концентрации метана в атмосфере, происходящая в результате экономической деятельности.

Проведены совместные вычислительные эксперименты по определению связи климатических и экологических процессов. Так, были установлены сильные обратные связи климата и параметров альbedo растительного покрова, а также климата и водного режима растительного покрова. Показано что при увеличении концентрации  $\text{CO}_2$  в атмосфере изменения альbedo и влажности, соответствующие смещению природных зон в результате парникового эффекта играют заметную роль, но действуют в противоположных направлениях [226].

Пожары, взрывы, аварии на промышленных и военных объектах сопровождаются в той или иной степени выбросами в атмосферу продуктов горения и взрывов. Применение модели ОЦА в расчетах дальнего переноса, эволюции и оседания продуктов горения и взрывов позволяют рассчитать эти процессы и дать прогнозы дальности распространения, областей оседания и степени загрязнения или заражения поверхности и влияния этих факторов на экосистемы. Применение созданных моделей и методов позволяет оценивать экологические перспективы при различных вариантах техногенных и антропогенных воздействий, а также эффективность природоохранных мероприятий и обеспечение безопасности населения и промышленных объектов с учетом риска и оценки последствий техногенных и естественно-природных катастроф.

Разработана система моделей воздействия атмосферных загрязнений промышленных предприятий на лесные экосистемы в регионе [238]. В модели учитывается пространственное распределение и возрастная структура лесной растительности. Были воспроизведены рождение, рост и гибель лесных растений, а также определялось движение зон деградации в регионе. Получены прогнозы развития зон деградации при различных сценариях деятельности промышленных комплексов на территории России.

## Литература

1. Шмыглевский Ю.Д. Аналитические исследования динамики газа и жидкости. М.: Эдиториал УРСС, 1999.
2. Дородницын А.А. Об одном методе численного решения некоторых нелинейных задач аэрогидродинамики // Тр. 3-го Всес. матем. съезда, 1956. Т. 3. М.: АН СССР, 1958. С. 447–453.
3. Дородницын А.А. Об одном методе решения уравнений ламинарного пограничного слоя. // Прикл. механ. и тех. физ. 1960. № 3. С. 111–118.
4. Чушкин П.И. Обтекание эллипсов и эллипсоидов дозвуковым потоком газа // Вычислительная математика, №2. М.: АН СССР, 1956. С. 20–44.
5. Белоцерковский О.М., Чушкин П.И. Численный метод интегральных соотношений // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1960. Т. 2, № 5. С. 731–759.
6. Чушкин П.И., Шмыглевский Ю.Д. Обзор исследований по газовой динамике (по работам лаборатории механики сплошных сред ВЦ АН СССР в 1955–1980 гг.). М.: ВЦ АН СССР, 1980.
7. Белоцерковский О.М. Обтекание кругового цилиндра с отошедшей ударной волной // Докл. АН СССР. 1957. Т. 113, № 3. С. 509–512.
8. Kim C.S. Experimental studies of supersonic flow past a circular cylinder // J. Phys. Soc. Japan. 1956. V. 11. № 4. P. 439–445.
9. Белоцерковский О.М. (редактор). Обтекание затупленных тел сверхзвуковым потоком газа. Теоретическое и экспериментальное исследования. Изд. 2-е. М.: ВЦ АН СССР, 1967.
10. Чушкин П.И. Передняя кромка тела с протоком, летящего со сверхзвуковой скоростью // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1979. Т. 19, № 3. С. 780–784.
11. Чушкин П.И. Намагниченные затупленные тела в гиперзвуковом потоке газа // Магнитн. гидродинамика. 1965. № 3. С. 67–75.
12. Чушкин П.И. Обтекание конуса со сверхзвуковой скоростью под углом атаки // Сб. теоретических работ по гидромеханике. М.: ВЦ АН СССР, 1970. С. 30–53.
13. Кацкова О.Н., Наумова И.Н., Шмыглевский Ю.Д., Шулишина Н.П. Опыт расчета плоских и осесимметричных сверхзвуковых течений методом характеристик. М.: ВЦ АН СССР, 1961.
14. Наумова И.Н. Метод характеристик для неравновесных течений несовершенного газа. М.: ВЦ АН СССР, 1964.
15. Кацкова О.Н., Крайко А.Н. Расчет плоских и осесимметричных сверхзвуковых течений при наличии необратимых процессов. М.: ВЦ АН СССР, 1964.
16. Кацкова О.Н., Чушкин П.И. Течение проводящего газа в сверхзвуковом сопле // Магнитн. гидродинамика. 1966. № 4. С. 11–18.
17. Чушкин П.И. Конус с малым затуплением в сверхзвуковом потоке под углом атаки // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1980. Т. 20, № 6. С. 1525–1535.
18. Чушкин П.И. Метод характеристик для пространственных сверхзвуковых течений. М.: ВЦ АН СССР, 1968.
19. Борисов В.М., Михайлов И.Е. Об установившихся трехмерных безвихревых движениях газа со сверхзвуковой скоростью // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1970. Т. 10, № 4. С. 1006–1015.
20. Ахметов Г.Б., Михайлов И.Е. Об организации итерационных процессов при использовании неявных трехмерных схем метода характеристик // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1975. Т. 15, № 2. С. 521–523.
21. Ахметов Г.Б. Об устойчивости разностных схем для системы дифференциальных уравнений гиперболического типа с тремя независимыми переменными // Изв. АН Каз. ССР. Сер. физ.-мат. 1972. № 1. С. 6–14.
22. Борисов В.М., Левин М.П., Михайлов И.Е. Использование сплайн-аппроксимаций для расчета давления по стенкам сверхзвуковых пространственных сопел // Уч. зап. ЦАГИ. 1979. Т. 10, № 6. С. 118–121.
23. Кацкова О.Н., Чушкин П.И. Пространственные сверхзвуковые течения газа с неравновесными процессами // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1968. Т. 8, № 5. С. 1049–1062.
24. Никольский А.А. О телах вращения с протоком, обладающих наименьшим волновым сопротивлением в сверхзвуковом потоке // Сб. теоретических работ по аэродинамике. М.: Оборонгиз, 1957. С. 56–63.
25. Охоцимский Д.Е. К теории движения ракет // Прикл. матем. и механ. 1946. Т. 10. Вып. 2. С. 251–272.
26. Шмыглевский Ю.Д. Некоторые вариационные задачи газовой динамики осесимметричных сверхзвуковых течений // Прикл. матем. и механ. 1957. Т. 21. Вып. 2. С. 195–208.
27. Rao G.V.R. Exhaust nozzle contour for optimum thrust // Jet Propuls. 1958. V. 28, № 6. P. 377–382.
28. Зубов В.И. О методе контрольного контура // Докл. РАН. 2004. Т. 394, № 1. С. 15–18.
29. Крайко А.Н. Вариационные задачи сверхзвуковых течений с произвольными термодинамическими свойствами. М.: ВЦ АН СССР, 1963.

30. Крайко А.Н. Вариационные задачи газовой динамики неравновесных и равновесных течений // Прикл. матем. и механ. 1964. Т. 28. Вып. 2. С. 285–295.
31. Борисов В.М., Шипилин А.В. О соплах максимальной тяги с произвольными изопериметрическими условиями // Прикл. матем. и механ. 1964. Т. 28. Вып. 1. С. 182–183.
32. Шипилин А.В. Вариационные задачи газовой динамики с присоединенными ударными волнами // Сб. теоретических работ по гидромеханике. М.: ВЦ АН СССР, 1970. С. 54–106.
33. Зубов В.И. Об оптимальном сверхзвуковом профиле заданного утолщения // Изв. АН СССР. МЖГ. 1976. № 1. С. 89–96.
34. Зубов В.И. К вопросу об оптимальном профиле крыла в потоке идеальной несжимаемой жидкости // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1980. Т. 20, № 1. С. 241–245.
35. Зубов В.И., Зуйкова З.Г. Об одном классе решений задачи оптимизации сопла гидропушки // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1994. Т. 34, № 10. С. 1541–1550.
36. Албу А.Ф., Зубов В.И., Инякин В.А. Оптимальное управление процессом плавления и кристаллизации вещества // Журн. вычисл. матем. и матем. физ. 2004. Т. 44, № 8. С. 1364–1379.
37. Borisov V.M., Mikhailov I.E. Optimal shape of a nozzle for three dimensional flow of gas // Fluid Dynam. Transact. V. 4. PWN: Warszawa, 1970. P. 149–153.
38. Михайлов И.Е. Форма сверхзвукового пространственного сопла, обладающего максимальной тягой // Журн. вычисл. матем. и матем. физ. 1973. Т. 13, № 1. С. 257–262.
39. Борисов В.М., Михайлов И.Е. Об оптимизации сверхзвуковых частей пространственных сопел // Журн. вычисл. матем. и матем. физ. 1981. Т. 21, № 2. С. 517–519.
40. Борисов В.М., Иванков А.А., Куриленко Ю.В., Михайлов И.Е. К разработке математических моделей и численных методов решения пространственных оптимизационных задач. М.: ВЦ РАН, 2003.
41. Михайлов И.Е. Необходимые условия оптимальности пространственных тел в сверхзвуковом потоке газа // Журн. вычисл. матем. и матем. физ. 1987. Т. 27, № 7. С. 1111–1114.
42. Борисов В.М., Михайлов И.Е. Расчет экстремальной формы сверхзвуковой части пространственного сопла. М.: ВЦ АН СССР, 1982.
43. Борисов В.М., Левин Н.П., Михайлов И.Е. Альбом пространственных сверхзвуковых сопел. М.: ВЦ АН СССР, 1989.
44. Коробейников В.П., Чушкин П.И. Плоский, цилиндрический и сферический взрыв в газе с противодействием // Тр. МИАН. 1967. Т. 87, С. 4–14.
45. Шуришалов Л.В. О расчете кумулятивных струй // Изв. АН СССР. МЖГ. 1975. № 4. С. 116–122.
46. Архангельский Н.А., Шуришалов Л.В. Задача о разлете конического объема раскаленного газа // Изв. АН СССР. МЖГ. 1977. № 1. С. 83–88.
47. Шуришалов Л.В. Расчет мощных подводных взрывов // Изв. АН СССР. МЖГ. 1971. № 5. С. 36–40.
48. Шуришалов Л.В. О точечном взрыве на свободной поверхности // Изв. АН СССР. МЖГ. 1971. № 3. С. 3–7.
49. Шуришалов Л.В. Численное исследование задачи о взрыве цилиндрического заряда конечной длины // Журн. вычисл. матем. и матем. физ. 1973. Т. 13, № 4. С. 971–983.
50. Шуришалов Л.В. Расчет взрыва тротилового бруса бесконечной длины // Изв. АН СССР. МЖГ. 1975. № 5. С. 130–135.
51. Коробейников В.П., Чушкин П.И., Шуришалов Л.В. О гидродинамических эффектах при полете и взрыве в атмосфере Земли крупных метеоритных тел // Метеоритика. 1973. Вып. 32. С. 73–89.
52. Коробейников В.П., Чушкин П.И., Шуришалов Л.В. О расчете наземных разрушений при воздушном взрыве метеорита // Космическое вещество на Земле (проблема Тунгусского метеорита). Новосибирск: Наука, 1976. С. 54–65.
53. Фаст В.Г., Баранник А.П., Разин С.А. О поле направлений повала деревьев в районе падения Тунгусского метеорита // Вопросы метеоритики. Томск: Томский ун-т, 1976. С. 39–52.
54. Александров В.В., Стенчиков Г.Л. О влиянии излучения на течение газа при сильном взрыве для большого значения времени // Прикл. матем. и механ. 1975. Т. 39. Вып. 2. С. 246–252.
55. Шуришалов Л.В. Крупномасштабный взрыв в неоднородной атмосфере Земли при учете спектрального излучения // Изв. АН СССР. МЖГ. 1982. № 6. С. 124–130.
56. Коробейников В.П., Чушкин П.И., Шуришалов Л.В. Численное моделирование полета и взрыва естественных космических тел // Проблемы прикладной математики и информатики. М.: Наука, 1987. С. 33–47.
57. Шуришалов Л.В. К расчету взрыва быстро летящего тела // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1986. Т. 26, № 6. С. 924–933.
58. Дубовой Э.И., Пряжинский В.И., Шуришалов Л.В. Численный расчет развития области взрыва в атмосфере. М.: РИАИАН СССР, 1987.
59. Шуришалов Л.В. Модель взрыва метеоритного тела // Изв. АН СССР. МЖГ. 1987. № 3. С. 138–143.

60. Плотников П.В., Шуришалов Л.В. Математическое моделирование процесса экстремально интенсивного взаимодействия космического пылевого облака с атмосферой Земли // *Астрономический вестник*. 1997. Т. 31, № 1. С. 1–10.
61. Плотников П.В., Шуришалов Л.В. Моделирование возможного процесса потери Марсом своей атмосферы // *Докл. РАН*. 2000. Т. 374, № 1. С. 49–54.
62. Плотников П.В., Шуришалов Л.В. Чем чреват град из космоса? // *Природа*. 2001. № 5. С. 11–18.
63. Александров В.В., Епихова Н.В. О расчете структуры ударной волны в селективно излучающем газе // *Материалы объединенного семинара по вычислительной физике (Сухуми, 1973 год)*. Тбилиси: ТГУ, 1975. С. 35–58.
64. Борисов В.М. О непрерывных ударных волнах в идеальном излучающем газе // *Ж. вычисл. матем. и матем. физ.* 1975. Т. 15, № 6. С. 1545–1552.
65. Александров В.В., Рыжов О.С. О нелинейной акустике излучающего газа. III. Экспоненциальная аппроксимация // *Ж. вычисл. матем. и матем. физ.* 1974. Т. 14, № 3. С. 717–727.
66. Котеров В.Н. О трансзвуковых течениях излучающего газа в каналах // *Ж. вычисл. матем. и матем. физ.* 1975. Т. 15, № 3. С. 682–694.
67. Александров В.В., Фролова А.А. О собственно трансзвуковых течениях излучающего газа в каналах со слабо меняющимися параметрами // *Прикл. матем. и матем. физ.* 1976. Т. 40. Вып. 5. С. 834–845.
68. Чарахчян А.А. Об одном подходе к расчету уравнения переноса для задач динамики излучающего газа // *Динамика излучающего газа*. Вып. 2. М.: ВЦ АН СССР, 1976. С. 16–35.
69. Борисов В.М. Использование квадратурного метода Гаусса в задачах радиационной газодинамики // *Динамика излучающего газа*. Вып. 1. М.: ВЦ АН СССР, 1974. С. 75–80.
70. Литвинович А.С. Решение задачи радиационного переноса численным методом пространственных характеристик // *Динамика излучающего газа*. Вып. 3. М.: ВЦ АН СССР, 1980. С. 118–130.
71. Котеров В.Н. Эквивалентность методов сферических гармоник, дискретных ординат и экспоненциальной аппроксимации для плоских задач теории переноса // *Динамика излучающего газа*. Вып. 1. М.: ВЦ АН СССР, 1974. С. 7–13.
72. Грынъ В.И. О  $N$ -обобщениях  $P_N$ -алгоритмов // *Ж. вычисл. матем. и матем. физ.* 1987. Т. 27, № 6. С. 954–955.
73. Грынъ В.И. Вариационные принципы для уравнения переноса и метод сферических гармоник // *Ж. вычисл. матем. и матем. физ.* 1986. Т. 26, № 9. С. 1433–1434. Поправка. 1987. Т. 27, № 3.
74. Грынъ В.И. Схемы расчета переноса излучения в движущемся рассеивающем газе // *Ж. вычисл. матем. и матем. физ.* 1980. Т. 20, № 3. С. 691–701.
75. Грынъ В.И. Схема расчета переноса излучения с комптоновским рассеянием // *Ж. вычисл. матем. и матем. физ.* 1981. Т. 21, № 3. С. 696–706.
76. Шмыглевский Ю.Д. Вариант моментного метода расчета переноса селективного излучения // *Ж. вычисл. матем. и матем. физ.* 1977. Т. 17, № 3. С. 785–790.
77. Кривцов В.М. Об одном подходе к расчету селективного излучения // *Ж. вычисл. матем. и матем. физ.* 1974. Т. 14, № 6. С. 1336–1339.
78. Кривцов В.М. О расчете селективного излучения // *Динамика излучающего газа*. Вып. 2. М.: ВЦ АН СССР, 1976. С. 36–41.
79. Чарахчян А.А., Шмыглевский Ю.Д. Численные методы в динамике излучающего газа // *Ж. вычисл. матем. и матем. физ.* 1980. Т. 20, № 5. С. 1249–1265.
80. Шипилин А.В. Итерационный численный метод расчета течений излучающего газа при дозвуковых скоростях // *Динамика излучающего газа*. Вып. 2. М.: ВЦ АН СССР, 1976. С. 78–89.
81. Александров В.В. Об одном методе расчета течений излучающего газа // *Изв. АН СССР. МЖГ*. 1970. № 4. С. 8–22.
82. Грынъ В.И., Марченко А.И., Урбан В.В. Численный метод решения уравнения переноса излучения в плоской и сферической геометрии // *Ж. вычисл. матем. и матем. физ.* 1990. Т. 30, № 8. С. 1210–1223.
83. Кривцов В.М. Расчет течений воздуха в трубе при воздействии лазерного излучения // *Динамика излучающего газа*. Вып. 3. М.: ВЦ АН СССР, 1980. С. 105–117.
84. Наумова И.Н., Шмыглевский Ю.Д. Расчет течений излучающего газа в трубе // *Динамика излучающего газа*. Вып. 2. М.: ВЦ АН СССР, 1976. С. 99–108.
85. Кривцов В.М. Трансзвуковые течения излучающего газа в цилиндрическом канале // *Динамика излучающего газа*. Вып. 2. М.: ВЦ АН СССР, 1976. С. 109–124.
86. Шильников Е.В. Исследование движения газа под действием сфокусированного лазерного излучения // *Динамика излучающего газа*. М.: ВЦ АН СССР, 1981. С. 74–92.
87. Зубов В.И., Кривцов В.М., Наумова И.Н., Шмыглевский Ю.Д. Расчет движения паров твердого тела под действием лазерного излучения // *Динамика излучающего газа*. Вып. 3. М.: ВЦ АН СССР, 1980. С. 76–104.

88. *Зубов В.И., Кривцов В.М., Наумова И.Н., Шмыглевский Ю.Д.* Расчет взаимодействия лазерного излучения с алюминиевым сосудом и его парами // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1980. Т. 20, № 6. С. 1513–1524.
89. *Зубов В.И., Кривцов В.М., Наумова И.Н., Шмыглевский Ю.Д.* Взаимодействие излучения неодимового лазера с алюминиевым сосудом и его парами // Динамика излучающего газа. М.: ВЦ АН СССР, 1981. С. 56–73.
90. *Борисов В.М., Голомазов М.М., Иванков А.А., Финченко В.С.* Расчет лучистого теплообмена в задачах обтекания тел с учетом потери массы теплозащитного покрытия // Изв. РАН. МЖГ. 2004. № 4. С. 143–151.
91. *Фролова А.А.* Расчет обтекания цилиндрических тел при малых числах Кнудсена // Вычислительная динамика разреженного газа. М.: ВЦ РАН, 2000. С. 27–37.
92. *Грынъ В.И.* Обратные задачи для уравнения переноса излучения при цилиндрической симметрии // Докл. АН СССР. 1985. Т. 234, № 5. С. 1101–1103.
93. *Грынъ В.И.* Обратные трехмерные задачи теории переноса излучения, близкие к двумерным плоским и к цилиндрическим // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1989. Т. 29, № 10. С. 1480–1491.
94. *Грынъ В.И.* Обратные задачи определения коэффициента поглощения и функции высвечивания для некоторых трехмерных областей // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1993. Т. 33, № 4. С. 578–599.
95. *Грынъ В.И.* Об обратных задачах стационарного переноса излучения // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1995. Т. 35, № 12. С. 1831–1853.
96. *Грынъ В.И.* О существовании и единственности решения уравнений энергии и переноса излучения // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1986. Т. 26, № 8. С. 1270–1272.
97. *Александров В.В., Быченков В.Ю., Стенчиков Г.Л., Тихончук В.Т.* О распадном механизме насыщения параметрической неустойчивости // Краткие сообщения по физике. ФИАН. 1976. № 11. С. 14–20.
98. *Александров В.В., Быченков В.Ю., Литвин С.Б., Пустовалов В.В., Силин В.П., Тихончук В.Т.* Быстрые электроны в магнитоактивной плазме, подвергающейся воздействию мощного излучения // Письма в ЖТФ. 1976. Т. 2. Вып. 19. С. 868–872.
99. *Андреев Н.Е., Силин В.П., Стенчиков Г.Л.* Численный метод решения системы уравнений Власова на основании комбинации методов частиц в ячейке и “водяного мешка” // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1979. Т. 19, № 1. С. 165–173.
100. *Андреев Н.Е., Силин В.П., Стенчиков Г.Л.* Нелинейное взаимодействие излучения с разлетающейся плазмой // ЖЭТФ. 1980. Т. 78. Вып. 4. С. 1396–1407.
101. *Хачатуров Р.В.* Математическое моделирование самофокусировки осесимметричных рентгеновских импульсов в плазме // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1999. Т. 39, № 12. С. 2003–2014.
102. *Александров В.В., Глотов Е.П., Данилычев В.А., Котеров В.Н., Сорока А.М.* К теории несамостоятельных объемных разрядов в молекулярных и благородных газах // Тр. ФИАН СССР. 1983. Т. 142. С. 46–94.
103. *Басов Н.Г., Данилычев В.А., Котеров В.Н., Перлов С.Г., Плышевская Т.М., Сорока А.М., Устинов Н.Д., Чебуркин Н.В., Глотов Е.П.* К расчету эффективности использования  $\alpha$ -излучения для предионизации рабочей смеси в газоразрядных лазерах и усилителях // Докл. АН СССР. 1985. Т. 281, № 5. С. 1106–1110.
104. *Котеров В.Н., Щепров А.В.* Уравнения нелинейной квазидиффузии для расчета энергетического спектра электронов в неоднородных полях произвольной силы // Физика плазмы. 1991. Т. 17, № 12. С. 1480–1489.
105. *Басов Н.Г., Глотов Е.П., Данилычев В.А., Котеров В.Н., Сорока А.М.* Характеристики сверхзвукового течения лазерной смеси в замкнутом газодинамическом контуре // Докл. АН СССР. 1980. Т. 254, № 3. С. 628–632.
106. *Бабаев И.К., Басов Н.Г., Глотов Е.П., Данилычев В.А., Котеров В.Н., Савельев В.В., Сорока А.М., Чебуркин Н.В., Югов В.И.* Расчет оптимальных режимов генерации непрерывных сверхзвуковых электроионизационных СО-лазеров // Докл. АН СССР. 1983. Т. 270, № 3. С. 600–604.
107. *Бабаев И.К., Белкин М.С., Котеров В.Н., Красновский А.Г., Чебуркин Н.В.* О распространении широкоапертурных лазерных пучков ИК-диапазона через атмосферу // Оптика атмосферы. 1990. Т. 3, № 2. С. 136–141.
108. *Бахтадзе А.Б., Вецко В.М., Воробьева Н.Н., Глотов Е.П., Гольшиков А.Н., Котеров В.Н., Кузовов В.Д., Негашев С.А., Сажина Н.Н., Чебуркин Н.В., Чекин С.К.* Исследование энергетических и спектральных характеристик непрерывного технологического электроионизационного лазера на изотопомодифицированной двуокиси углерода // Квантовая электроника. 1986. Т. 13, № 1. С. 5–10.
109. *Блинов Н.А., Котеров В.Н., Красновский А.Г., Чебуркин Н.В.* Акустические волны в активной среде импульсно-периодических ЭИ лазеров и их влияние на расходимость излучения // Ж. технич. физ. 1990. Т. 60, № 11. С. 169–177.

110. *Бабаев И.К., Котеров В.Н., Красновский А.Г., Чебуркин Н.В.* Предельные яркостные характеристики излучения непрерывного CO<sub>2</sub>-усилителя с поперечной прокачкой активной среды // Ж. техн. физ. 1991. Т. 62, № 1. С. 124–136.
111. *Блинов Н.А., Котеров В.Н., Красновский А.Г., Саковец С.В., Чебуркин Н.В.* Особенности генерации импульсного CO<sub>2</sub>-лазера с самофильтрующим неустойчивым резонатором при развитом самовоздействии излучения в активной среде. 1. Теоретический анализ // Квантовая электроника. 1990. Т. 17, № 7. С. 844–850.
112. *Бардаковский С.В., Блинов Н.А., Горбачев Ю.П., Котеров В.Н., Красновский А.Г., Саковец С.В., Чебуркин Н.В.* Особенности генерации импульсного CO<sub>2</sub>-лазера с самофильтрующим неустойчивым резонатором при развитом самовоздействии излучения в активной среде. 2. Результаты экспериментов и оптимизация выходных характеристик // Квантовая электроника. 1991. Т. 18, № 7. С. 816–821.
113. *Миргородский Ю.Н., Руденко А.А., Шипилин А.В.* Новый подход к численному анализу двумерных полупроводниковых структур с  $p-n$  переходами // Микроэлектроника. М.: Сов. радио, 1976. С. 124–147.
114. *Майоров С.А., Руденко А.А., Шипилин А.В.* О численном методе решения системы уравнений для потенциала и носителей заряда в полупроводниковых структурах // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1980. Т. 20, № 1. С. 112–120.
115. *Петров В.М., Селляхова О.В., Шипилин А.В.* Численное моделирование нестационарных процессов в компенсированных полупроводниках со слабоионизованными примесями // Электронная промышленность. 1984. № 9. С. 17–32.
116. *Коротков А.Ю., Шипилин А.В.* Об использовании метода приближенной факторизации для расчета потенциала в полупроводниковых структурах // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1989. Т. 29, № 6. С. 915–922.
117. *Епифанов М.С., Шипилин А.В., Шленский В.Н.* Численное исследование процесса переноса заряда в полупроводниковых фотопреобразователях // Матем. моделирование. 1990. Т. 2, № 3. С. 23–30.
118. *Шипилин А.В., Шленский В.Н.* Итерационный метод численного решения уравнений полупроводниковой плазмы // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1992. Т. 32, № 11. С. 1778–1789.
119. *Гогриччани М.Г., Шипилин А.В.* Итерационный метод стыковки решений уравнений теплового баланса в различных областях термоохладителя // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 2001. Т. 41, № 12. С. 1893–1906.
120. *Гогриччани Г.В., Шипилин А.В.* Переходные процессы в пневматических системах. М.: Машиностроение, 1986.
121. *Кикоть П.Б., Шипилин А.В.* ПС-система — пакет программ расчета переходных процессов в пневматических устройствах. М.: ВЦ АН СССР, 1986.
122. *Грудницкая Т.Я., Зубов В.И., Котеров В.Н., Кривцов В.М., Шипилин А.В., Щепров А.В.* Расчет нестационарных течений насыщенного пара в трубопроводах // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1995. Т. 35, № 6. С. 977–987.
123. *Зубов В.И., Котеров В.Н., Кривцов В.М., Шипилин А.В.* Нестационарные газодинамические процессы в газопроводе на подводном переходе через Черное море // Матем. моделирование. 2001. Т. 13, № 4. С. 58–70.
124. *Осипов И.Л., Пащенко В.П., Шипилин А.В.* Расчет течений невязкого газа в каналах с сильно изменяющейся геометрией // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1978. Т. 18, № 4. С. 964–973.
125. *Осипов И.Л., Шипилин А.В., Шулишнина Н.П.* Численный метод расчета течений газа в каналах и соплах в прямой, обратной и комбинированной постановках // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1987. Т. 27, № 10. С. 1563–1572.
126. *Осипов И.Л., Котеров В.Н., Пащенко В.П.* О профилировании плоского сверхзвукового сопла, обеспечивающего равномерный поток в выходном сечении // Ученые записки ЦАГИ. 1987. Т. 18, № 3. С. 48–56.
127. *Dokolin A.Yu., Osipov I. L., Shipilin A.V.* Computation of Transonic Gas Flow past Plane Turbine Cascades // Modern Problem in Computational Aerohydrodynamics. Boca Raton: Mir Publishers /CRS Press, 1992. P. 20–33.
128. *Кривцов В.М.* Об одной схеме приближенной факторизации для расчета течений газа в каналах // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1994. Т. 34, № 11. С. 1680–1692.
129. *Каратаев С.Г., Котеров В.Н.* Численный метод расчета сверхзвуковых течений вязкого газа // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1990. Т. 30, № 4. С. 586–600.
130. *Каратаев С.Г., Котеров В.Н.* К решению обратной задачи для внутренних течений вязкого газа со сверхзвуковым ядром // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1991. Т. 31, № 5. С. 790–793.
131. *Карабущенко Л.Л., Котеров В.Н.* Расчет принудительно индуцированных вихревых воронок в жидкости со свободной поверхностью // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 2001. Т. 41, № 2. С. 256–268.

132. *Гойхенберг М.М., Дробышевский А.Н., Зубов В.И., Котеров В.Н., Кривцов В.М., Стародумов А.В.* Математическая модель и пакет программ для расчета трехмерных течений газа в многоступенчатых охлаждаемых осевых турбинах // Тр. Всероссийск. конф. "Прикладная геометрия, построение расчетных сеток и высокопроизводительные вычисления". Т. 1. М.: ВЦ РАН, 2004. С. 119–130.
133. *Котеров В.Н., Кочерова А.С., Кривцов В.М.* Об одной методике расчета течений несжимаемой жидкости // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 2002. Т. 42, № 4. С. 550–558.
134. *Зубов В.И., Инякин В.И., Калачев Е.Н., Котеров В.Н., Кривцов В.М.* Численное моделирование пространственных течений газа в неосесимметричных эжекторных соплах // Тр. Всероссийск. конф. "Прикладная геометрия, построение расчетных сеток и высокопроизводительные вычисления". Т. 1. М.: ВЦ РАН, 2004. С. 131–142.
135. *Архипов Б.В., Котеров В.Н., Кочерова А.С., Солбаков В.В., Хубларян. Г.М.* Моделирование обтекания гидротехнических сооружений в шельфовой зоне моря // Водные ресурсы. 2003. Т. 30, № 6. С. 1–6.
136. *Архипов Б.В., Котеров В.Н., Солбаков В.В.* Трехмерное моделирование обтекания гидротехнических сооружений на океаническом шельфе. М.: ВЦ РАН, 2004.
137. *Чарахчьян А.А.* Численное исследование сжатия дейтерия в конической мишени при наличии сильного кумулятивного эффекта // Прикл. механ. и техн. физ. 1994. Т. 35, № 4. С. 22–32.
138. *Чарахчьян А.А.* Численное исследование спонтанного электромагнитного поля, генерируемого кольцевыми кумулятивными струями в конических мишенях // Физика плазмы. 1998. Т. 24, № 4. С. 349–355.
139. *Charakhch'yan A.A.* Numerical investigation of circular cumulative jets compressing deuterium in conical targets // Plasma Phys. Control. Fusion. 1997. V. 39. № 2. P. 237–247.
140. *Charakhch'yan A.A., Krasnyuk I.K., Pashinin P.P., Semenov A.Yu.* On mechanism of deuterium heating in laser experiments with conical targets // Laser and Particle Beams. 1999. V. 17. № 4. P. 749–752.
141. *Charakhch'yan A.A.* Reshocking at the non-linear stage of Richtmyer-Meshkov instability // Plasma Phys. Control. Fusion. 2001. V. 43. № 9. P. 1169–1179.
142. *Чарахчьян А.А.* Ударное сжатие пластины на клине // Прикл. механ. и тех. физ. 2001. Т. 42, № 1. С. 17–24.
143. *Беляков Г.В., Чарахчьян А.А.* О нагреве сжимаемой жидкости постоянным потоком тепла // Прикл. механ. и тех. физ. 2003. Т. 44, № 2. С. 109–115.
144. *Ломоносов И.В., Фортвов В.Е., Фролова А.А., Хищенко К.В., Чарахчьян А.А., Шуршалов Л.В.* Численное исследование сжатия графита и его превращения в алмаз в конической мишени // Ж. техн. физ. 2003. Т. 73. Вып. 6. С. 66–75.
145. *Чарахчьян А.А., Ломоносов И.В., Милявский В.В., Фортвов В.Е., Фролова А.А., Хищенко К.В., Шуршалов Л.В.* О сходящихся ударных волнах в пористых средах // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. Вып. 1. С. 72–77.
146. *Charakhch'yan A.A., Ivanenko S.A.* A variational form of the Winslow grid generator // J. Comput. Phys. 1997. V. 136. № 2. P. 385–398.
147. *Грынь В.И., Фролова А.А., Чарахчьян А.А.* Сеточный генератор барьерного типа и его применение для расчета течений с подвижными границами // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 2003. Т. 43, № 6. С. 904–916.
148. *Чарахчьян А.А.* Почти консервативные разностные схемы для уравнений газовой динамики // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1993. Т. 33, № 11. С. 1681–1692.
149. *Чарахчьян А.А.* О симметричной и несимметричной схемах расщепления для уравнений газовой динамики // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1991. Т. 31, № 11. С. 1692–1705.
150. *Charakhch'yan A.A.* Compound difference schemes for time-dependent equations on nonuniform nets // Commun. in Numer. Meth. in Engineering. 1994. V. 10. № 2. P. 93–110.
151. *Чарахчьян А.А.* Об алгоритмах расчета распада разрыва для схемы С.К.Годунова // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 2000. Т. 40, № 5. С. 782–796.
152. *Y.G. Evlushenko, E.S. Zasuhina, V.I. Zubov.* FAD Method to Compute Second Order Derivatives // Automatic Differentiation of Algorithms. From Simulation to Optimization. New York: Inc. Springer-Verlag, 2002. P. 327–333.
153. *Люлька В.А., Михайлов И.Е.* О построении интерполяционных кривых // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 2003. Т. 43, № 8. С. 1138–1140.
154. *Чарахчьян А.А.* Об одном соотношении между произведениями ортогональных полиномов // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1979. Т. 19, № 3. С. 765–767.
155. *Azarenok B.N., Ivanenko S.A.* Application of moving adaptive grids for numerical solution of nonstationary problems in gas dynamics // Intern. Journ. for Numer. Methods in Fluids. 2002. V. 39. № 1. P. 1–22.
156. *Азаренок Б.Н.* О применении вариационного барьерного метода в гиперболических задачах газовой динамики // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 2003. Т. 43, № 7. С. 1072–1096.

157. Шмыглевский Ю.Д. Однородные формы уравнений Навье — Стокса в случае установившихся плоскопараллельных течений несжимаемой жидкости // Докл. РАН. 2002. Т. 384, № 3. С. 316–317.
158. *Crudeli U.* Sopra una categoria di moti stazionari dei liquidi (pesanti) viscosi entro tubi cilindrici (rotondi) verticali // Atti Reale Accad. Naz. dei Lincei. Rendiconti. 1927. Ser. 6. V. 6. № 10. P. 397–401.
159. Пальцев Б.В., Шмыглевский Ю.Д. О подходе разделяющей линии тока к обтекаемому контуру в плоскопараллельном потоке вязкой жидкости // Изв. РАН. МЖГ. 2002. № 2. С. 76–89.
160. Шмыглевский Ю.Д., Щепров А.В. О вихревых системах в вязкой жидкости вблизи угловой точки границы // Изв. РАН. МЖГ. 2002. № 1. С. 62–73.
161. Шмыглевский Ю.Д., Щепров А.В. О плоскопараллельных отрывных течениях несжимаемой жидкости у плоских границ // Изв. РАН. МЖГ. 2002. № 5. С. 12–21.
162. Шмыглевский Ю.Д., Щепров А.В. Точное представление некоторых осесимметричных вихревых образований в вязкой несжимаемой жидкости // Докл. РАН. 2003. Т. 389, № 6. С. 489–492.
163. Щепров А.В. Получение аналитических решений уравнений Навье — Стокса для осесимметричных и плоских течений вязкой несжимаемой жидкости // Докл. РАН. 2004. Т. 394, № 5. С. 626–630.
164. Щепров А.В. Пример внешнего обтекания сферы вязкой несжимаемой жидкостью при произвольном числе Рейнольдса // Докл. РАН. 2004. Т. 395, № 4. С. 485–486.
165. Грынъ В.И. О семействах точных решений стационарных уравнений Эйлера и Навье — Стокса // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1998. Т. 38, № 8. С. 1423–1424.
166. Кривцов В.М. Об одной численной схеме решения уравнений Навье — Стокса // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1986. Т. 26, № 6. С. 914–923.
167. Зубов В.И., Кривцов В.М., Наумова И.Н., Шмыглевский Ю.Д. Сравнение трех методов расчета обтекания пластины вязким газом // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1987. Т. 27, № 6. С. 940–945.
168. Щепров А.В. Расчет одного двумерного аналога течения Куэтта // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1993. Т. 33, № 3. С. 469–476.
169. Архипов Б.В., Люлька В.А. О вычислении скорости диссипации вихрей Тэйлора // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1993. Т. 33, № 10. С. 1587–1594.
170. Люлька В.А. Гидродинамическое сопротивление периодической решетки // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1994. Т. 34, № 4. С. 627–631.
171. Борисов В.М., Люлька В.А. О некоторых течениях вязкой жидкости, для которых реализуется принцип минимума диссипации кинетической энергии // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1999. Т. 39, № 12. С. 2095–2100.
172. Люлька В.А. О принципе минимума диссипации кинетической энергии в нелинейной гидродинамике вязкой жидкости // Ж. техн. физ. 2001. Т. 71. Вып. 12. С. 13–15.
173. Грудницкая Т.Я., Люлька В.А., Шипилин А.В. Формула для вычисления коэффициента гидродинамического сопротивления трубы с внезапным расширением при малых числах Рейнольдса // Прикл. механ. и технич. физ. 2004. Т. 45, № 3. С. 81–84.
174. Котеров В.Н., Шмыглевский Ю.Д. О стоксовских плоскопараллельных вихревых системах в каналах // Изв. РАН. МЖГ. 2000. № 5. С. 57–65.
175. Дородницын А.А. Ламинарный пограничный слой в сжимаемом газе // Докл. АН СССР. 1942. Т. 34, № 8. С. 234–242.
176. Дородницын А.А. Пограничный слой в сжимаемом газе // Прикл. матем. и механ. 1942. Т. 6. Вып. 6. С. 449–486.
177. Жук В.И. Волны Толлмина-Шлихтинга и солитоны. М.: Наука. 2001.
178. Рыжов О.С. Асимптотические методы в динамике жидкости // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1980. Т. 20. № 5. С. 1221–1248.
179. Диесперов В.Н., Рыжов О.С. Асимптотические методы в механике жидкости // Изв. АН СССР. МЖГ. 1982. № 2. С. 75–87.
180. Жук В.И., Рыков В.А., Шахов Е.М. Кинетические модели и задача о структуре ударной волны // Изв. АН СССР. МЖГ. 1973. № 4. С. 135–141.
181. Жук В.И., Шахов Е.М. Разлет плоского слоя разреженного газа в вакуум // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1973. Т. 13. № 4. С. 984–998.
182. Жук В.И. Некоторые асимптотические свойства макропараметров разреженного газа при расширении в вакуум // Прикл. матем. и механ. 1977. Т. 41. Вып. 1. С. 72–78.
183. Жук В.И. Течение разреженного газа от сферического источника при малых числах Кнудсена // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1976. Т. 16, № 3. С. 738–749.
184. Жук В.И. Сферическое расширение пара при испарении капли // Изв. АН СССР. МЖГ. 1976. № 2. С. 97–102.
185. Жук В.И. Кинетика испарения сферической капли // Численные методы в динамике разреженных газов. М.: ВЦ АН СССР. 1978. Вып. 4. С. 69–90.



186. *Жук В.И.* Решение кинетического уравнения для газа в поле тяготения планеты // Докл. АН СССР. 1977. Т. 233, № 3. С. 325–328.
187. *Жук В.И.* О тепловом убегании атомов планетарной атмосферы // Численные методы в динамике разреженных газов. М.: ВЦ АН СССР. 1978. Вып. 4. С. 91–99.
188. *Жук В.И., Шахов Е.М.* О колебаниях спутника-зонда малой массы под действием аэродинамических и гравитационных сил // Космические исследования. 1990. Т. 28. Вып. 6. С. 820–830.
189. *Рыжов О.С., Терентьев* О нестационарном пограничном слое с самоиндуцированным давлением // Прикл. матем. и механ. 1977. Т. 41. Вып. 6. С. 1007–1023.
190. *Жук В.И., Рыжов О.С.* Свободное взаимодействие и устойчивость пограничного слоя в несжимаемой жидкости // Докл. АН СССР. 1980. Т. 253, № 6. С. 1326–1329.
191. *Ryzhov O.S., Zhuk V.I.* Stability and separation of freely interacting boundary layer // Lecture Notes in Physics. 1981. № 141. P. 360–366.
192. *Жук В.И., Рыжов О.С.* Об устойчивости свободно взаимодействующего пограничного слоя // Прикл. матем. и механ. 1981. Т. 45. Вып. 3. С. 552–563.
193. *Ryzhov O.S., Zhuk V.I.* On the stability of a compressible boundary layer against three-dimensional disturbances with self-induced pressure gradient // Current Problems in Computational Fluid Dynamics. Mathematics and Mechanics Series. MIR Publishers, Moscow, 1986. P. 286–307.
194. *Козлов В. В., Рыжов О. С.* Восприимчивость пограничного слоя: асимптотическая теория и эксперимент // М.: ВЦ АН СССР. 1988.
195. *Рыжов О.С., Савенков И. В.* Асимптотический подход в теории гидродинамической устойчивости // Математическое моделирование. 1989. Т. 1, № 4. С. 61–86.
196. *Рыжов О.С., Савенков И.В.* Об устойчивости пограничного слоя при трансзвуковых скоростях внешнего потока // Прикл. механ. и технич. физ. 1990. № 2. С. 65–71.
197. *Савенков И.В.* О неустойчивости осесимметричного пограничного слоя при трансзвуковых скоростях внешнего потока // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1999. Т. 39. № 8. С. 1405–1414.
198. *Савенков И.В.* О влиянии упругости обтекаемой поверхности на устойчивость пограничного слоя при трансзвуковых скоростях внешнего потока // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 2001. Т. 41, № 1. С. 135–140.
199. *Жук В.И., Рыжов О.С.* О свободном взаимодействии пристеночных слоев с ядром течения Пуазейля // Докл. АН СССР. 1981. Т. 257, № 1. С. 55–59.
200. *Bogdanova E.V., Ryzhov O.S.* Free and induced oscillations in Poiseuille flow // Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics. 1983. V.36. Pt.2. P. 271–287.
201. *Savenkov I. V.* Wave packets, resonant interactions and soliton formation in inlet pipe flow // J. Fluid Mech. 1993. V. 252. P. 1–30.
202. *Савенков И. В.* О нестационарных осесимметричных течениях в трубах с упругими стенками // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1996. Т. 36. № 2. С. 147–163.
203. *Жук В.И., Проценко И.Г.* О нейтральных кривых в задаче устойчивости плоского течения Куэтта-Пуазейля // Некоторые проблемы фундаментальной и прикладной математики. Сборник научных трудов. М.: МФТИ. 2004. С.61–74.
204. *Жук В.И., Проценко И.Г.* Асимптотика решений уравнения Орра-Зоммерфельда в окрестностях двух ветвей нейтральной кривой // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 2003. Т. 43, № 11. С. 1737–1753.
205. *Жук В.И., Рыжов О.С.* Об отрыве сверхзвукового пограничного слоя // Проблемы прикладной математики и информатики. М.: Наука, 1987. С. 90–103.
206. *Жук В.И., Рыжов О.С.* О локально-невязких возмущениях в пограничном слое с самоиндуцированным давлением // Докл. АН СССР. 1982. Т. 263. № 1. С. 56–59.
207. *Жук В.И., Попов С.П.* О нелинейном развитии длинноволновых невязких возмущений в пограничном слое // Прикл. механ. и технич. физ. 1989. № 3. С.101–108.
208. *Жук В.И., Попов С.П.* Моделирование нелинейных волн в пограничных слоях на основе уравнений Бюргерса, Бенджамина-Оно и Кортевега-де Вриза // Матем. моделирование. 1990. Т. 2, № 7. С. 97–110.
209. *Жук В.И.* Об одном варианте асимптотической теории нестационарного свободного взаимодействия пограничного слоя с трансзвуковым потоком // Прикл. матем. и механ. 2001. Т. 65. Вып. 1. С. 69–85.
210. *Жук В.И.* Асимптотическая модель замкнутой срывной зоны в сверхзвуковом потоке // Изв. РАН. МЖГ. 1992. № 2. С.76–84.
211. *Жук В.И., Попов С.П.* О солитонных решениях двумерного уравнения Захарова-Кузнецова // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1998. Т. 38. № 1. С. 122–135.
212. *Бибик Ю.В., Жук В.И.* О динамике солитонов двумерных нелинейных эволюционных уравнений гидродинамического типа // Матем. моделирование. 2000. Т. 12. № 9. С. 109–126.
213. *Рыжов О.С.* О нестационарном пограничном слое с самоиндуцированным давлением при околозвуковых скоростях внешнего потока // Докл. АН СССР. 1977. Т. 236. № 5. С. 1091–1094.

214. Диесперов В.Н., Королев Г.Л. Возникновение сверхзвуковых зон и зон локального отрыва при трансзвуковом стационарном обтекании неровности поверхности в режиме свободного взаимодействия // Изв. РАН. МЖГ. 2003. № 1. С. 54–58.
215. Диесперов В.Н., Липатов И.И. Модели процессов взаимодействия течения в ламинарном пограничном слое с трансзвуковым потоком // Изв. РАН. МЖГ. 2003. № 5. С. 36–40.
216. Диесперов В.Н., Попов С.П. Структура течения при нестационарном трансзвуковом обтекании плоской пластины с поперечным шелевым вдувом // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 2002. Т. 42. № 11. С. 1744–1755.
217. Александров В.В., Архипов П.Л., Пархоменко В.П., Стенчиков Г.Л. Глобальная модель системы океан – атмосфера и исследование ее чувствительности к изменению концентрации CO<sub>2</sub> // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1983. Т. 19. № 5. С. 451–458.
218. Пархоменко В.П., Стенчиков Г.Л. Математическое моделирование климата. М.: Знание, 1986.
219. Parkhomenko V.P., Shipilin A.V., Zabelok S.A. AGCM parallel algorithm development for cluster computers // Research activities in atmospheric and oceanic modelling. Ed. by J.Cote. Geneva: World Meteorological Organization, 2004. V. 34. P. 3.19–3.20.
220. Ганопольский А.В. Многослойная модель сезонной изменчивости океана // Океанология. 1991. Вып. 21. № 5. С. 123–130.
221. Мочалов А.А. Моделирование интерактивного взаимодействия климата и биоты // Матем. моделирование. 2000. Т. 12, № 4. С. 12–17.
222. Быков С.В., Пархоменко В.П. Моделирование циркуляции атмосферы, океана и эволюции морского льда в Арктическом регионе. М.: ВЦ РАН, 2002.
223. Parkhomenko V.P. Sea Ice Cover Sensitivity analysis in Global Climate Model // Research activities in atmospheric and oceanic modelling. Geneva: World Meteorological Organization, 2003. V. 33. P. 7.19–7.20.
224. Пархоменко В.П. Верификация климатической модели. М.: ВЦ АН СССР, 1988.
225. Александров В.В., Стенчиков Г.Л. Об одном вычислительном эксперименте, моделирующем климатические последствия ядерной войны // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1984. Т. 24, № 1. С. 140–144.
226. Мочалов А.А., Пархоменко В.П., Тарко А.М. Глобальное потепление и Арктика // Экология и жизнь. 1999. № 4. С. 38–40.
227. Моисеев Н.Н., Александров В.В., Тарко А.М. Человек и биосфера. Опыт системного анализа и эксперименты с моделями. М.: Наука, 1985.
228. Пархоменко В.П., Тарко А.М. Ядерная зима // Экология и жизнь. 2000. № 3. С. 44–47.
229. Александров Г.А., Арманд А.Д., Свирежнев Ю.М., Стенчиков Г.Л., Тарко А.М. и др. Математические модели экосистем. Экологические и демографические последствия ядерной войны. М.: Наука, 1986.
230. Тарко А.М. Учение Н.Н. Моисеева о развитии биосферы и общества // Атлас временных вариаций природных антропогенных и социальных процессов. Природные и социальные сферы как часть окружающей среды и как объекты воздействия. Т. 3. М.: Научный мир, 2002. С. 12–19.
231. Тарко А.М. Модель глобального цикла углерода // Природа. 1994. № 7. С. 27–32.
232. Тарко А.М., Кузнецова М.В. Пространственно распределенная модель глобального цикла углерода в биосфере // Матем. моделирование. 2001. Т. 13, № 9. С. 45–54.
233. Tarco A.M. Analysis of Global and Regional Changes in Biogeochemical Carbon Cycle: A Spatially Distributed Model: Interim Report, IR-03-041, IIASA. Laxenburg, Austria: IIASA, 2003. (<http://www.iiasa.ac.at/Publications/Documents/IR-03-041.pdf>).
234. Бушцев В.В., Голубев В.С., Тарко А.М. Индикаторы социоприродного развития российских регионов. М.: ИАЦ Энергия, 2004.
235. Тарко А.М. Устойчивость биосферных процессов и принцип Ле-Шателье // Докл. РАН. 1995. Т. 343, № 3. С. 393–395.
236. Нефедова Е.И., Тарко А.М. Зональная модель глобального цикла двуокиси углерода в системе атмосфера-океан // Океанология. 1995. Т. 35, № 1. С. 11–15.
237. Перванюк В.С., Тарко А.М. Моделирование глобального цикла углерода в системе атмосфера-океан // Матем. моделирование. 2001. Т. 13, № 11. С. 13–22.
238. Тарко А.М., Быкадоров А.В., Крючков В.В. Моделирование действия атмосферных загрязнений на лесные экосистемы в регионе // Докл. РАН. 1995. Т. 341, № 4. С. 571–573.

## ОТДЕЛ СИСТЕМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

*В.А. Серебряков, С.А. Абрамов, А.И. Срагович, В.И. Филиппов*

---

Отдел систем математического обеспечения был создан одновременно с ВЦ АН СССР в 1955 г. Назывался он вначале лабораторией программирования, заведующим которой был назначен Владимир Михайлович Курочкин (1926–1999).

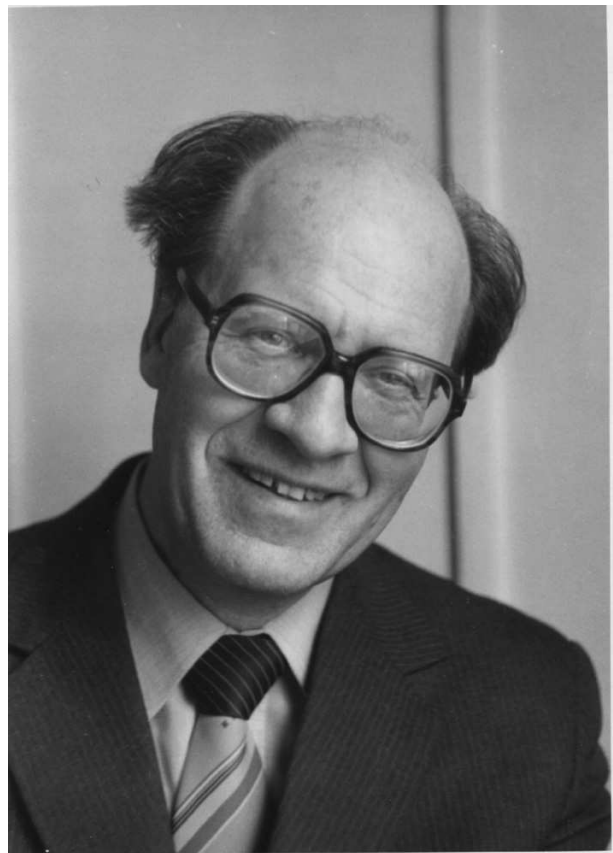
В.М. Курочкин закончил механико-математический факультет МГУ и аспирантуру этого факультета под руководством выдающегося алгебраиста XX века А.Г. Куроша. После опубликования нескольких научных работ по теории колец и алгебр и защиты в 1949 г. кандидатской диссертации В.М. Курочкин начал работать в МФТИ, а в 1950 г. поступил в Институт точной механики и вычислительной техники (ИТМ и ВТ) АН СССР, где принял активное участие в разработке системы команд БЭСМ — одной из первых отечественных ЭВМ. За эту работу В.М. Курочкин был награжден орденом Трудового Красного знамени.

В дальнейшем В.М. Курочкин занялся новой в то время областью науки — программированием. Под его руководством лаборатория становится одним из основных центров программирования в СССР. Со временем из нее выделились несколько коллективов, составивших ядра других подразделений ВЦ АН, а также других институтов (Вычислительный центр Сибирского отделения АН СССР и Центральный экономико-математический институт).

Одним из первых в СССР В.М. Курочкин стал заниматься вопросами автоматизации программирования, возглавил работу над созданием “программирующих программ”, а затем — языков программирования и трансляторов. Большой вклад внес В.М. Курочкин в работы по языкам программирования. Он был активным участником международной группы по автоматизации программирования, разработавшей язык Алгамс.

С 1948 г. В.М. Курочкин вел педагогическую работу в МФТИ. Им разработаны вузовские программы по обеспечению ЭВМ, линейному программированию, методам трансляции. Многие специалисты по программированию считают себя учениками В.М. Курочкина. Под его руководством выполнено много диссертационных работ в области реализации языков программирования и теории программирования. Он являлся членом редколлегии Журнала вычислительной математики и математической физики с момента его основания, а также членом редколлегии журнала “Программирование”, редактором и переводчиком ряда изданий.

Владимир Михайлович моментально схватывал математические и программистские идеи, даже изложенные самым невнятным образом. После короткой дискуссии у доски в его кабинете или на семинаре отдела он часто находил совершенно простой ответ на обсуждавшийся



*В.М. Курочкин*



*Группа сотрудников ИТМ и ВТ в день награждения за работу по созданию БЭСМ АН СССР в Кремле (1956 г.) с зам. Председателя Президиума Верховного Совета СССР К.М. Озолинем и секретарем Президиума Верховного Совета СССР А.Ф. Горкиным. Сидят (слева-направо): Ю.А. Крицкий, В.В. Бардиж, Ю.Д. Панов, А.Ф. Горкин, С.И. Лебедев, К.М. Озолин, М.А. Лаврентьев, И.С. Мухин, И.Д. Визун (Горелова), Д.Т. Стукалов. Стоят (слева-направо): В.М. Курочкин, А.А. Абрамов, А.И. Срагович, П.И. Козулин, Н.Н. Фориш, В.В. Похлебкин, Н.В. Абаев, Л.В. Сидорова (Гаврилова), Ю.Р. Валашек, А.А. Москвин, Н.П. Зубрилин, А.Г. Лаут, Г.Т. Артамонов, В.С. Бурцев, Ю.И. Визун, В.А. Зимин, В.С. Чунаев*

вопрос — фактически, почти любой вопрос “тривиализировался”. Это видение предмета обсуждения и поставленной задачи насквозь вместе с исключительной изобретательностью приводили Владимира Михайловича к чемпионским достижениям в области системного программирования, одним из которых был знаменитый и не имевший равных транслятор с Алгола для БЭСМ-6.

Один из ранних эпизодов программистской деятельности Владимира Михайловича (о чем он рассказывал сам) выглядит отчасти фантастическим. В свое время он был вовлечен в работы по запуску первого искусственного спутника Земли и составлял программы для расчета траектории. Использовалась новая модель вычислительной машины, которая в момент начала этих работ еще не была оснащена, в частности, стандартными подпрограммами вычисления тригонометрических функций. Составлением этих программ занимались другие люди. Как рассказывал Владимир Михайлович, надеясь на скорое появление этих подпрограмм, он приступил к отладке своих расчетных программ, временно вставляя в них некие “болванки”, заменяющие вычисление настоящих синусов и косинусов. И только когда спутник был запущен, он вспомнил, что забыл заменить эти “болванки” обращениями к подпрограммам. На вопрос, как же спутник летал, Владимир Михайлович отвечал, что эти “болванки” вместо значений тригонометрических функций давали значения “хорошо распределенных” случайных величин.

Надо было “всего-навсего” понять, что такое в той ситуации хорошее распределение. Для Владимира Михайловича здесь не было проблемы!\*

При образовании лаборатории программирования в 1955 г. она состояла из нескольких отделов. Один из отделов, куда входили А.И. Срагович (руководитель отдела), Н.Н. Стрелкова, Э.Н. Чайковская, Г.И. Седанкина, А.Я. Фалетова, С.С. Токмалева, Л.Д. Панова и Т.А. Кашина, был сформирован еще в ИТМиВТ для составления программ слежения за спутниками. Вначале отдел занимался программированием задач для академических организаций, закрытых задач для некоторых НИИ, составлением стандартных программ (обращение матриц, решение дифференциальных уравнений и т. п.).

Расчеты для спутников начались с конца 1955 г. Методика расчетов была создана в ВЦ АН под руководством В.М. Курочкина. В ВЦ была установлена аппаратура, которая принимала замеры летящего спутника (скорость, ускорение, зенит, азимут и др.). Необходимо было найти наилучшие начальные условия для системы дифференциальных уравнений движения спутника. Были составлены программы:

1. Обработка данных, вводимых по коду Хемминга (Г.И. Седанкина, Н.Н. Стрелкова).

2. Краевая задача решения системы 43 уравнений движения спутника — нахождение наилучших начальных условий (А.Я. Фалетова).

3. Выдача координат спутника для пунктов наблюдения, при первых запусках — для пунктов СССР, а затем и для зарубежных (А.И. Срагович).

4. Приземление спутника. Цель программы — найти координаты приземления космонавта (сначала собак, а потом — Ю. Гагарина и Г. Титова) (Э.Н. Чайковская).

За работу по этой теме правительство наградило исполнителей медалями, благодарностями, грамотами и денежными премиями. Работа по спутникам и космическим кораблям продолжалась до 1962 г. Во время запусков спутников и космических кораблей ВЦ АН закрывался для всех, кроме группы А.И. Срагович, во дворе выставялась охрана с прожекторами. Расчеты проводились на БЭСМ.

Работы по автоматизации программирования начинались с создания “программирующих программ” (ПП). ПП для БЭСМ [1], разработанная А.П. Ершовым, Л.Н. Королевым, В.М. Курочкиным, Л.Д. Паниной и В.Д. Поддерюгиным, развивала входной язык программирующих программ. Во-первых, она объединяла схему и спецификацию операторов в одном тексте, во-вторых, был введен первый структурный оператор, а именно — столь существенный оператор цикла (соответствующий современным циклам с параметром).

Была проделана большая работа по созданию фундаментальных алгоритмов трансляции, таких как программирование арифметических выражений, реализация условий переходами и т. п. С использованием идей и алгоритмов этих работ была развернута деятельность по развитию ПП. В 1957–1958 гг. создавались ПП для различных модификаций “Стрелы”. Надо вспомнить, что серийного производства ЭВМ как такового тогда не существовало, и все производимые



Г.И. Седанкина, Н.Н. Стрелкова, А.И. Срагович,  
С.С. Токмалева



А.Я. Фалетова

\* Добавление С.А. Абрамова: Изобретательский и исследовательский талант Владимира Михайловича проявлялся во всем. В один из последних наших разговоров он рассказывал мне, что нашел способ приготовления яиц всмятку, исключая разлом скорлупы в кипятке. Ранее он признавался, что, купив новый фотоаппарат или проигрыватель, он оказывался не в силах дождаться истечения гарантийного срока и через несколько дней вскрывал пломбы, чтобы посмотреть на устройство...

экземпляры “Стрелы” расходились в деталях архитектуры. Под руководством В.М. Курочкина были создан транслятор программирующей программы для машины “Стрела-3” (ППС) [2] (разработчики Т.М. Великанова, А.П. Ершов, К.В. Ким, В.М. Курочкин, Ю.А. Олейник-Овод, В.Д. Поддерюгин), был реализован ряд методов новых тогда, но ставших классическими сейчас — табличный подход к синтаксическому анализу, оптимальное (по числу рабочих переменных) программирование арифметических выражений. Вслед за этим В.М.Курочкиным была разработана оригинальная, широко применявшаяся система КИС (компилирующая и интерпретирующая система) и транслятор с Алгола для БЭСМ-2.

В ВЦ АН СССР в 1964 г. началась установка машины БЭСМ-6, а отдел стал называться “Отдел трансляторов”. Работы в области системного программирования активно поддерживались директором ВЦ АН академиком А.А. Дородницыным. Под руководством В.М. Курочкина и при участии А.И. Срагович, Г.И. Седанкиной, А.Я. Фалетовой и Д.Б. Подшивалова был создан транслятор с Алгола-60 для БЭСМ-6 [3] интерпретирующего типа, который включал в себя использование стандартных программ транслятора языка Фортран со многими улучшениями, в частности была разработана более быстрая выборка из массивов. Транслятор широко использовался во многих организациях, где была установлена БЭСМ-6. Кроме того, группой в составе А.И. Срагович, Г.И. Седанкиной и Н.Н. Стрелковой был создан транслятор для машины ЦПАС-6, который был полностью отлажен и работал в нескольких НИИ. В течение многих лет проводились консультации по использованию транслятора БЭСМ-Алгол, хотя транслятор выдавал весьма обширную отладочную информацию.

Отдел всегда оказывал большую консультативную помощь по программированию многим организациям и отдельным лицам сначала по работе в машинных кодах, затем на автокоде, по использованию библиотек стандартных программ и т. п.

С 1957 г. отделом автоматизации программирования в лаборатории программирования ВЦ АН СССР заведовал Андрей Петрович Ершов (1931–1988). А.П.Ершов закончил мехмат МГУ в 1954 г. (это был первый в советских вузах массовый выпуск по специальности “программирование”) и аспирантуру этого факультета под руководством А.А. Ляпунова.

В круг научных интересов А.П. Ершова входили проблемы автоматизации программирования [4–8]. Изданная в 1958 г. книга А.П. Ершова “Программирующая программа для Быстродействующей электронной счетной машины” была первой в мировой литературе монографией по автоматизации программирования (уже в 1959 г. ее перевели на английский язык [9] и издали в Англии). Начало работ А.П. Ершова в этом направлении было положено операторными схемами, предложенными А.А. Ляпуновым. А.П. Ершовым был независимо (и практически одновременно с Петерсеном) изобретен метод хеширования, который применялся к экономии арифметических выражений.

С образованием Сибирского отделения АН СССР А.П.Ершов переходит в Вычислительный центр СО РАН. В 1970 г. он становится членом-корреспондентом, а в 1984 г. — академиком АН СССР.

Значительное место в формировании научных направлений отдела принадлежит Виктору Денисовичу Поддерюгину (1928–2001).

Научная школа, к которой принадлежал В.Д. Поддерюгин (он, как и В.М.Курочкин, был учеником А.Г.Куроша), и его собственные принципы развили в нем очень строгие представления о том, что есть научный результат. Происходящая отсюда завышенная взыскательность Виктора Денисовича препятствовала (совершенно, как представляется, неоправданно) публикации им его многих очень интересных научных идей, которыми он при этом щедро и совершенно бескорыстно всегда был готов делиться с коллегами. Те немногие его работы, которые были им все-таки опубликованы, имеют высочайший рейтинг. Его результаты по упорядоченным группам и кольцам [10, 11] цитируются А.Г. Курошем в его книге “Лекции по общей алгебре” среди классических. Его исследование по хеш-функциям [12] отмечено во втором издании третьего тома “Искусства программирования” Д. Кнута. Тут надо добавить, что результаты этого исследования по хеш-функциям, сами по себе значительные, впоследствии были Виктором Денисовичем развиты и обобщены. В.М. Курочкин высоко оценивал это продвижение и как заведующий отделом “давил” на Виктора Денисовича с тем, чтобы он готовил публикацию; под этим давлением статья была в конце концов закончена (появились отпечатанные на машинке



А.П. Ершов



В.Д. Поддерюгин

страницы с вписанными формулами), но дальше этого дело не пошло, и, насколько известно, в редакцию какого-либо журнала эта статья Виктором Денисовичем отправлена не была. При этом, если кто-нибудь из коллег хотел узнать мнение Виктора Денисовича о своей работе, то Виктор Денисович не жалел времени, чтобы понять до тонкостей все, что касается этой работы, и делал по ней очень глубокие замечания, часто указывая на пробелы и ошибки.

В 1966 г. лабораторию систем математического обеспечения (СМО), которая включала три отдела, в частности, отдел В.М. Курочкина, возглавил член-корреспондент АН СССР Святослав Сергеевич Лавров (1923–2004) — один из разработчиков первых отечественных трансляторов для ЭВМ.

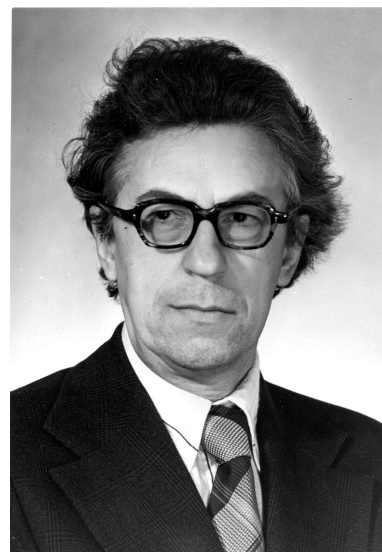
С.С. Лавровым были выполнены многие работы по трансляторам с языков обработки символьной информации для БЭСМ-6 (Снобол-А, 1968, совместно с Л.И. Гончаровой; Лисп, 1970, совместно с Г.С. Силагадзе) [13–17]. В русле работ, инициированных С.С. Лавровым и проводившихся в течение определенного времени под его научным руководством, следует также назвать расширение Лиспа (В.М. Юфа [18]), разработку и реализацию геометрического языка Геомал (И.Е. Педанов, К.П. Голиков [19–21]), исследования по компьютерной алгебре (В.В. Тумасонис [22, 23], С.А. Абрамов [24]).

Язык АБВ, один из первых в мире экспериментальных расширяемых языков программирования, был предложен С.С.Лавровым как альтернатива Алголу-68 (в этой работе участвовали Е.Н. Капустина и М.И. Селюн [16]). В материалах Рабочей группы WG2.1 IFIP именно С.С. Лавровым был сформулирован общепринятый сегодня тезис о необходимости интеграции языков программирования со средствами взаимодействия с операционной средой, ставший прообразом современной концепции API (Application Program Interface).

В 1971 г. после переезда в Ленинград С.С. Лавров возглавил Институт теоретической астрономии АН СССР.

В 1971 г. лаборатория СМО преобразуется в отдел СМО, заведующим которым становится В.М. Курочкин. Внутри отдела были образованы и затем в течение ряда лет существовали сектор обработки символьной информации (зав. сектором В.М. Брябрин) и сектор машинной геометрии (зав. сектором И.Е. Педанов).

Работа над трансляторами естественно привлекла внимание В.М. Курочкина к вопросам автоматизации их разработки и формализации описания языков программирования [25]. В основу



С.С. Лавров

такой формализации был положен аппарат атрибутивных грамматик. Были сделаны обобщения атрибутивных грамматик, позволяющие использовать их более эффективно для определения языков программирования. В.М. Курочкиным был предложен оригинальный асинхронный алгоритм вычисления семантических атрибутов.

Под руководством В.М. Курочкина началась разработка системы построения трансляторов Супер, основанной на атрибутивном подходе. Было расширено классическое определение атрибутов Кнута введением глобальных и структурных атрибутов [26, 27]. В качестве синтаксического анализатора использовался LR(1)-анализатор, атрибуты вычислялись универсальным алгоритмом.

Вообще за годы работы над программным обеспечением БЭСМ-6 были реализованы трансляторы со следующих языков программирования:

- Алгол-60 (В.М. Курочкин, А.И. Срагович, Г.И. Седанкина, Н.Н. Стрелкова, А.Я. Фалетова),
- Паскаль (С.И. Пирин),
- APL (С.П. Прохоров),
- Алгол-W (Г.Н. Заварза, Ю.А. Шебеко),
- АБВ (С.С. Лавров, М.И. Селюн, Е.Н. Капустина),
- Снобол-A (С.С. Лавров, Л.И. Гончарова),
- Лисп (С.С. Лавров, Г.С. Силагадзе, В.М. Юфа),
- Модула-2 (В.А. Серебряков, А.Н. Бездушный, В.Г. Лютый),
- Система построения трансляторов Супер (В.М. Серебряков, А.Н. Бездушный),
- Геомал (И.Е. Педанов, К.П. Голиков).

В ситуации столь активной разработки программного обеспечения БЭСМ-6 назрела необходимость ускорить процесс разработки и отладки программ. Под руководством В.М. Брябрина была создана система Пульт коррекции, запуска и отладки программ с выносных (расположенных в комнатах программистов) терминалов [28]. Основным разработчиком системы был В.М. Сафонов. Теперь вместо 2–3 отладочных запусков в день с перфокарт можно было выполнить 10–20 таких запусков за один час. Эта система мгновенно обрела популярность во всех отделах ВЦ АН, сотрудники в комнатах записывались в очередь к своему терминалу. Вскоре эту систему начали использовать в большинстве организаций, применявших БЭСМ-6. Позднее был реализован многопользовательский вариант — система Сервис.



*В.М. Брябрин*

Под руководством В.М. Брябрина была создана также система Дилос взаимодействия с ЭВМ на естественном языке, в работе над которой участвовал ряд сотрудников и аспирантов отдела [29–33]. Работы по программному обеспечению персональных компьютеров начались в секторе В.М. Брябрина (А.Б. Борковский, Г.Г. Гнездилова, О.А. Гончаров, В.В. Пономарев, Г.В. Сенин, Л.В. Кулешова и др.) с момента появления этих компьютеров в нашей стране [34, 35]. Значительное внимание было уделено возможности введения формальных схем диалоговых процессов. Адаптивные диалоговые системы, основанные на этом подходе, позволили реализовать основные требования к диалоговым системам [36–39].

В 1980-х годах сотрудники отдела С.А. Абрамов, Г.Г. Гнездилова, О.А. Гончаров, Е.В. Зима, Е.Н. Капустина, М.И. Селюн и Г.В. Сенин внесли заметный вклад в решение проблем включения информатики в программу средней школы. Ими было опубликовано несколько книг по школьной информатике (например, [40–44]). Следует добавить, что еще в середине 1970-х гг. С.А. Абрамовым и И.Н. Антиповым было издано учебное пособие [45], в котором обобщался опыт многолетнего преподавания программирования сотрудниками ВЦ АН СССР в московской школе № 52 (подшефной школе ВЦ АН СССР).

В то же время С.А. Абрамовым были получены результаты по верификации программ [46], был предложен оптимальный в среднем алгоритм одновременного поиска максимального и



минимального элементов массива [47] и совместно с Г.Г. Гнездиловой алгоритм “кратных карт” выбора вопросов в системах обучения [48].

Еще одно важное направление деятельности отдела СМО — развитие теории и разработка методов реализации систем управления базами данных — было возглавлено Виктором Ивановичем Филипповым. В течение 1967–1970 гг. им была разработана интерпретирующая система Диалог для БЭСМ-6, с которой пользователи общались в интерактивном режиме сначала через телетайпы, а потом и через дисплеи. Именно для работы над этой системой в ВЦ АН был подсоединен к БЭСМ-6 первый “пользовательский” интерактивный терминал-телетайп.



*Д.Б. Подшивалов, В.И. Филиппов, В.М. Курочкин*

По методам реализации этой системы В.И. Филиппов защитил в 1976 г. кандидатскую диссертацию, после чего сразу же обратился к новой проблематике — базам данных.

В 1977–1978 гг. была разработана “архивная система” Марс-6 для БЭСМ-6, представляющая собой интерпретируемый “микрокод” основных и вспомогательных операций обращения к базам данных, широко используемая в ВЦ АН СССР и других организациях страны для реализации систем хранения и СУБД различных моделей.

В 1979 г. совместно с И.В. Величко была реализована сетевая СУБД Альма-1 с доступом (и реализацией) через Алгол-60, а в 1980 г. — сетевая СУБД Компас [49] с доступом (и реализацией) через язык Паскаль БЭСМ-6. В то же время (с аспирантом Н.С. Зуем) была реализована первая в стране реляционная СУБД Сурна и интерактивная реляционная СУБД Дисур.

Тогда же формируется группа аспирантов и сотрудников ВЦ АН, специализирующихся на работах в области баз данных и ИПС. Деятельность этой группы сосредотачивается в основном на развитии теории баз данных и реализации системы Компас [50]. Реализация основных модулей системы на Паскале с применением “раскрутки” (самоиспользования) позволила перенести и развивать ее на всех популярных типах ЭВМ: СМ-4 (С.Е. Тихомиров), ЕС ЭВМ (А.В. Шкотин) и персональных компьютерах (В.В. Пржиялковский и О.А. Полукеев).

Система Компас становится одной из наиболее широко применяемых СУБД в стране (и за рубежом — в Чехословакии и на Кубе). В связи с активным использованием этой СУБД в определенный момент пришлось создать одну из первых в стране систем полноценного форматирования текстов (статей и репринтов, с переносом слов и автоматическим оглавлением), реализованную на Паскале для всех имеющихся видов ЭВМ. Опубликовано большое число научных работ, посвященных теоретико-множественным основам баз данных, моделям данных, представлению и свойствам метаданных, методам реализации [51–53].

В.И. Филиппов читал лекции и вел семинары по базам данных (БД) в МФТИ, под его руководством прошла защита ряда диссертационных работ в области реализации СУБД, он являлся заместителем председателя Комиссии по БД АН СССР и членом, а затем и руководителем советской делегации в Комитете по БД академий наук СЭВ.

С 1994 г. В.И. Филиппов подключился к направлению реализации распределенных информационных систем в WWW [54].

С 1991 г. отдел СМО возглавляет доктор физ.-матем. наук, профессор Владимир Алексеевич Серебряков. В.А. Серебряков поступил в аспирантуру ВЦ АН в 1972 г. В 1976 г. защитил кандидатскую диссертацию на тему “Входной язык и реализация метапроцессора системы Лорд”. Работа была посвящена разработке системы построения трансляторов, в которой в качестве метода синтаксического анализа использовался анализ с возвратами, а семантика описывалась Лисп-подобными макрокомандами. При возвратах состояние вычислителя сохранялось в магазине [55]. В новой версии системы Супер [56, 57] с целью повышения эффективности атрибутивные грамматики были дополнены операторами обращения к подпрограммам, связываемыми



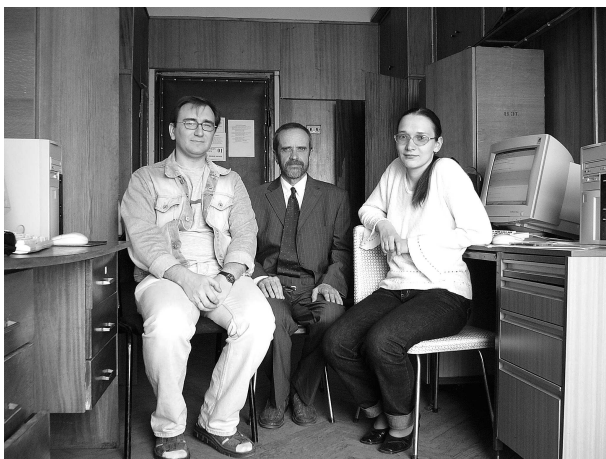
*В.А. Серебряков, В.М. Курочкин*

ных методов генерации кода, в том числе методов локальной оптимизации. По итогам работы над системой Супер В.А. Серебряковым была защищена докторская диссертация на тему “Системы автоматизации построения трансляторов и их применение для эффективной реализации языков программирования” (1990 г).

Затем был выполнен ряд работ по автоматической параллелизации программ. Был предложен язык Синапс/3, предназначенный для разработки программ для систем с массовым параллелизмом.

Язык представлял собой расширение Си. Расширения языка позволяли описывать распределение данных и распределение управления по процессорам [60, 61]. В рамках этой работы рассматривались вопросы трансляции распределенных циклов для многопроцессорных систем с распределенной памятью. Основная проблема здесь — это генерация условий циклов, параметризованных относительно номера процессора, исполняющего SMPD-программу. Задача решалась для систем вложенных циклов, условия которых являются линейными выражениями относительно индуктивных переменных охватывающих циклов [62].

В последние годы основное направление деятельности В.А. Серебрякова — создание распределенных информационных систем, в частности цифровых (электронных) библиотек. Коллективом, возглавляемым В.А. Серебряковым и А.Н. Бездушным, проведен анализ свойств этого класса распределенных информационных систем. Создана интегрированная система информационных ресурсов (ИСИР). На принципах ИСИР реализован информационный портал Российской академии наук (ИСИР РАН) [63]. ИСИР можно рассматривать в трех аспектах. Во-первых, это определенная методология, поддержанная соответствующей технологией разработки распределенных информационных систем. Во-вторых, это ядро решения, которое лежит в основе разнообразных приложений. В-третьих, это сами эти приложения, способные объединяться на



*Д.Е. Хмельнов, С.А. Абрамов, А.А. Рябенко*

с определенным обходом дерева разбора программы. С помощью этой системы был реализован язык программирования Модуль-2 [58]. Была принята двухпроходная схема реализации языка. В качестве промежуточного языка использовался Лидер [59].

Система автоматизации построения трансляторов была применена для полного описания транслятора: описания входного языка, проверки контекстных условий, генерации в промежуточный язык и генерации кода. Разработанные методы трансляции включали в себя обработку сложных структур данных, средства явного управления видимостью, генерации промежуточного представления, атрибу-

тивных методов генерации кода, в том числе методов локальной оптимизации. По итогам работы над системой Супер В.А. Серебряковым была защищена докторская диссертация на тему “Системы автоматизации построения трансляторов и их применение для эффективной реализации языков программирования” (1990 г).

Затем был выполнен ряд работ по автоматической параллелизации программ. Был предложен язык Синапс/3, предназначенный для разработки программ для систем с массовым параллелизмом.

Язык представлял собой расширение Си. Расширения языка позволяли описывать распределение данных и распределение управления по процессорам [60, 61]. В рамках этой работы рассматривались вопросы трансляции распределенных циклов для многопроцессорных систем с распределенной памятью. Основная проблема здесь — это генерация условий циклов, параметризованных относительно номера процессора, исполняющего SMPD-программу. Задача решалась для систем вложенных циклов, условия которых являются линейными выражениями относительно индуктивных переменных охватывающих циклов [62].

В последние годы основное направление деятельности В.А. Серебрякова — создание распределенных информационных систем, в частности цифровых (электронных) библиотек. Коллективом, возглавляемым В.А. Серебряковым и А.Н. Бездушным, проведен анализ свойств этого класса распределенных информационных систем. Создана интегрированная система информационных ресурсов (ИСИР). На принципах ИСИР реализован информационный портал Российской академии наук (ИСИР РАН) [63]. ИСИР можно рассматривать в трех аспектах. Во-первых, это определенная методология, поддержанная соответствующей технологией разработки распределенных информационных систем. Во-вторых, это ядро решения, которое лежит в основе разнообразных приложений. В-третьих, это сами эти приложения, способные объединяться на основе ядра. В основе архитектуры и реализации ИСИР лежит стремление создать систему, способную быть максимально интегрированной в современное мировое информационное пространство, прежде всего в Интернет, и в перспективе в Semantic Web. С другой стороны, как было отмечено выше, в основе решения лежит ядро, обеспечивающее базовую функциональность разнообразных приложений и построение на его основе распределенных информационных систем [64].

Работы в области компьютерной алгебры (символьных вычислений) — области информатики, методы которой направлены на решение научных задач на уровне математических формул, ведутся под руководством Сергея



*Сотрудники и аспиранты отдела. Слева-направо первый ряд: А.А. Бездушный, А.К. Нестеренко, Т.М. Сысоев, В.А. Серебряков, С.А. Абрамов, А.Н. Бездушный. Второй ряд: В.И. Филиппов, Д.В. Котеров, Д.А. Кальченко, О.И. Ганцева, А.М. Меденников. Третий ряд: Г.Н. Заварза, А.В. Вершинин, А.В. Шкотин, А.С. Аджиев*

Александровича Абрамова, который работает в отделе с 1972 г. С.А. Абрамов учился в аспирантуре ВЦ АН с 1969 г. по 1972 г., в 1972 г. защитил кандидатскую, а 1983 г. — докторскую диссертацию. Среди результатов, полученных С.А. Абрамовым и его группой (в которую в настоящее время входят А.А. Рябенко и Д.Е. Хмельнов), следует в первую очередь отметить следующие.

Предложены и реализованы в различных системах компьютерной алгебры алгоритмы решения задач, среди которых: аддитивная декомпозиция неопределенных сумм рациональных функций (аналог алгоритма Остроградского для неопределенных интегралов) [65]; та же самая задача для неопределенных сумм гипергеометрических термов [66]; нахождение рациональных решений линейных дифференциальных, разностных и  $q$ -разностных уравнений с полиномиальными коэффициентами [67, 68]; нахождение  $q$ -гипергеометрических решений линейных  $q$ -разностных уравнений с полиномиальными коэффициентами [69].

Ряд алгоритмов был разработан в рамках теории некоммутативных полиномов Оре (эти алгоритмы являются настраиваемыми на дифференциальный, разностный,  $q$ -разностный и некоторые другие случаи): алгоритм для “аккуратного интегрирования” решений уравнений [70]; алгоритм периферийной факторизации полиномов Оре [71]; алгоритм поиска даламберовых решений для однородного случая [72] и для случая уравнения с даламберовой правой частью [73]. Также был предложен ряд алгоритмов, связанных с поиском для дифференциальных, разностных и  $q$ -разностных линейных уравнений с полиномиальными коэффициентами их решений, имеющих вид степенных рядов, в частности поиск точек, в которых уравнение имеет решение в виде ряда с гипергеометрическими коэффициентами [74], поиск точек, в которых уравнение имеет решение в виде ряда с разреженной последовательностью коэффициентов [75] и т. д. Эти результаты были использованы в задаче разложения алгебраической функции в ряд Пуизо с полиномиальными, рациональными, гипергеометрическими,  $m$ -разреженными и  $m$ -гипергеометрическими коэффициентами [76]. Разработан алгоритм вычисления наибольшего общего делителя полиномов, зависящих от параметра [77]. Получено корректное решение проблемы орбит для рациональных чисел [78]. Для алгоритма Цейлбергера, являющегося

эффективным вспомогательным средством при доказательстве широкого класса комбинаторных тождеств, найдено конструктивно проверяемое необходимое и достаточное условие завершения в конечное время выполнения этого алгоритма применительно к данному гипергеометрическому терму двух переменных [79]. Доказана гипотеза Вилфа–Цейлбергера о том, что гипергеометрический терм является правильным, если и только если он голономен [80]. Разработан прямой алгоритм (названный EG<sup>3</sup>) решения произвольных линейных дифференциальных, разностных и  $q$ -разностных систем с полиномиальными коэффициентами, основанный на регуляризации (т.е. их преобразовании к эквивалентному виду с невырожденной ведущей или трейлинговой матрицей) индуцированных ими рекуррентных систем [81].

В настоящее время отдел продолжает активную работу по решению актуальных задач теории и разработки систем математического обеспечения.

Авторы благодарны В.Г. Абрамову, А.Н. Бездушному, Г.Г. Гнездиловой, Г.Н. Заварзе, С.В. Курочкину, Г.В. Сенину, Н.Н. Стрелковой, А.Я. Фалетовой и Ю.Д. Шмыглевскому за помощь в сборе информации по истории отдела.

### Литература

1. Курочкин В.М., Ершов А.П. Автоматическое программирование, современное состояние, основные проблемы // Тез. докл. совещ. по вычисл. математике и применению средств вычисл. техники. Баку, 1958. С. 15.
2. Курочкин В.М., Ершов А.П., Великанова Т.М., Ким К.В. Программирующая программа для машины “Стрела” (ППС) // Тез. докл. совещ. по вычисл. математике и применению средств вычисл. техники. Баку, 1958. С. 16.
3. Курочкин В.М., Подшивалов Д.Б., Седанкина Г.И., Срагович А.И., Стрелкова Н.Н., Фалетова А.Я. Система БЭСМ-АЛГОЛ. Вторая Всесоюз. конф. по программированию. Новосибирск, 1970.
4. Ершов А.П. Программирующая программа для БЭСМ АН СССР // Тр. конф. “Пути развития советского математического машиностроения и приборостроения”. Секция универсальных цифровых машин, Москва, 12–17 марта 1956 г. М.: ВИНТИ, 1956. Ч. 3. С. 18–29.
5. Ершов А.П. Automatic Programming in the Soviet Union // Datamation. 1959. Vol. 5, № 4. P.14–16; 18; 20.
6. Ершов А.П. О программировании арифметических операторов // Докл. АН СССР. 1958. Т. 118, № 3. С. 427–430.
7. Ершов А.П. Операторные алгоритмы. I. (Основные понятия) // Проблемы кибернетики. 1960. Вып. 3. С. 5–48.
8. Ершов А.П., Г.И. Кожухин, Ю.М. Волошин. Входной язык системы автоматического программирования: Предв. сообщ. М.: ВЦ АН СССР, 1961. 176 с.
9. Ершов А.П. Программирующая программа для быстродействующей электронной счетной машины. М.: АН СССР, 1958. 116 с. Англ. пер.: Programming Programme for the BESM computer. London a.o.: Pergamon Press, 1959. 158 p.
10. Поддерюгин В.Д. Условие упорядоченности произвольного кольца // Успехи мат. наук. 1954. Т. 9, № 4. С. 211–216.
11. Поддерюгин В.Д. Условия упорядоченности группы // Изв. АН СССР. Серия матем. 1957. Т. 21, № 2. С. 199–208.
12. Podderjugin V. Uber die Organisation von Speichern nach dem Prinzip der Adressenberechnung, “III Intern. Koll. Uber Aktuelle Probleme der Rechentechnik”, Wiss. Z. der Techn. Univ. Dresden 17, H. 5 (1968), 1087–1089.
13. Лавров С.С., Гончарова Л.И. Автоматическая обработка данных. Хранение информации в памяти ЭВМ. М.: Наука, 1971. 160 с.
14. Лавров С.С. Универсальный язык программирования (Алгол 60). 3-е изд. М.: Наука, 1972.
15. Лавров С.С. Введение в программирование. Учебное пособие. М.: Наука, 1973. 351 с.
16. Лавров С.С. и др. Расширяемый алгоритмический язык АБВ // Обработка символьной информации. Вып. 3. М.: ВЦ АН СССР, 1976.
17. Лавров С.С., Силагадзе Г.С. Автоматическая обработка данных. Язык ЛИСП и его реализация. М.: Наука, 1978. 176 с.
18. Юфа В.М. О новых фунуциях в системе ЛИСП-БЭСМ-6. Обработка символьной информации. Вып. 4. М.: ВЦ АН СССР, 1978. С. 26–50.

19. *Педанов И.Е.* О разрешимости проблемы принадлежности точки объекту в языке для обработки геометрической информации. ЖВМиМФ. 1974. Т. 14. № 2.
20. *Педанов И.Е., Голиков К.П.* ГЕОМАЛ — входной язык системы обработки геометрической информации. Обработка символьной информации. Вып. 4. М.: ВЦ АН СССР, 1978. С. 84–107.
21. *Голиков К.П., Педанов И.Е.* Реализация языка ГЕОМАЛ. Обработка символьной информации. Вып. 4. М.: ВЦ АН СССР, 1978. С. 108–129.
22. *Тумасонис В.В.* Система эквивалентных преобразований выражений // ЖВМиМФ. 1971. Т. 11, № 5. С. 1272–1281,
23. *Тумасонис В.В.* Расширение системы эквивалентных преобразований выражений // ЖВМиМФ. 1972. Т. 12, № 2. С. 552–556.
24. *Абрамов С.А.* О суммировании рациональных функций // ЖВМиМФ. 1971. Т. 11, № 4. С. 1071–1075.
25. *Курочкин В.М., Столяров Л.Н., Сушков Б.Г., Флеров Ю.А.* Теория и реализация языков программирования. Курс лекций. М.: МФТИ, 1973; 1978.
26. *Бирюков А.Н., Курочкин В.М., Серебряков В.А.* Глобальные атрибуты и их применение при определении языков программирования // ЖВМиМФ. 1980. 6 с.
27. *Бирюков А.Н., Курочкин В.М., Серебряков В.А.* Архитектура и реализация СПТ Супер. Обработка символьной информации. Вып. 5. М.: ВЦ АН СССР, 1984.
28. *Брябрин В.М., Еселев Г.И., Пирин С.И., Сафонов В.М., Селюн М.И., Серебряков В.А., Сметанин В.Л., Филиппов В.И., Юфа В.М.* Система ПУЛЬТ-78 (руководство к пользованию). М.: ВЦ АН СССР, 1978. 100 с.
29. *Абрамов В.Г., Брябрин В.М., Пховелишвили М.Г., Сенин Г.В., Элигулашвили А.А.* ДИЛОС-77: организация и обслуживание системы. М.: ВЦ АН СССР, 1978.
30. *Абрамов В.Г., Брябрин В.М., Пховелишвили М.Г., Сенин Г.В., Элигулашвили А.А.* ДИЛОС — Диалоговая система для взаимодействия с ЭВМ на естественном языке. М.: ВЦ АН СССР, 1979.
31. *Брябрин В.М., Сенин Г.В.* ДИЛОС — Диалоговая информационно-логическая система // Семиотика и информатика. Вып. 9. М.: ВИНТИ, 1977.
32. *Гнездилова Г.Г.* Реализация мониторов планирования и исполнения вычислений в системе ДИЛОС // Управляющие системы и машины. 1980. № 3.
33. *Гнездилова Г.Г.* Метод проектирования вычислительных процессов // Программирование. 1980. № 3. С. 44–51.
34. *Брябрин В.М.* Программное обеспечение персональных ЭВМ. 3-е изд., стер. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1990.
35. *Гнездилова Г.Г.* Резидентная сервисная система для персонального компьютера // Микропроцессорные средства и системы. 1986. № 4.
36. *Гончаров О.А.* Адаптивный диалог — технология программирования // Обработка символьной информации. Вып. 5. М.: ВЦ АН СССР, 1984.
37. *Сенин Г.В.* О сетевой модели диалога // Обработка символьной информации. Вып. 5. М.: ВЦ АН СССР, 1984.
38. *Борковский А.Б.* Диалоговая система программирования. Основные концепции // Обработка символьной информации. Вып. 5. М.: ВЦ АН СССР, 1984.
39. *Пономарев В.В.* Диалоговая система, базирующаяся на методе К-единиц // Обработка символьной информации. Вып. 5. М.: ВЦ АН СССР, 1984.
40. *Абрамов С.А., Зима Е.В.* Начала программирования на языке Паскаль. М.: Наука, 1987. 111 с.
41. *Абрамов С.А., Гнездилова Г.Г., Капустина Е.Н., Селюн М.И.* Задачи по программированию. М.: Наука, 1988. 224 с.
42. *Абрамов С.А., Зима Е.В.* Начала информатики. М.: Наука, 1988. 256 с.
43. *Гиглавый А.В., Гнездилова Г.Г., Гуткин М.Л.* Программирование на языке Бейсик для школьной ЭВМ. М.: ВЦ АН СССР, 1986.
44. *Гиглавый А.В., Гнездилова Г.Г., Гуткин М.Л.* Дополнительные возможности языка Бейсик для школьной ЭВМ. М.: ВЦ АН СССР, 1986.
45. *Абрамов С.А., Антипов И.Н.* Алгоритмический язык Алгол 60. М.: Просвещение, 1975.
46. *Абрамов С.А.* Элементы анализа программ: частичные функции на множестве состояний. М.: Наука, 1986, 128 с.
47. *Абрамов С.А.* Исследование алгоритмов одновременного нахождения наибольшего и наименьшего элементов массива // ЖВМиМФ. 1982. № 2.
48. *Абрамов С.А., Гнездилова Г.Г.* Алгоритм управления вопросником в автоматизированной обучающей системе // Вестник МГУ. Сер. 15. 1988. № 2.

49. Филиппов В.И. Руководство по СУБД Компас М.: ВЦ АН СССР, 1981. 48 с.
50. Полукеев О.А., Тихомиров С.Е., Филиппов В.И., Шкотин А.В. Семейство СУБД "Компас". М.: ВЦ АН СССР, 1987.
51. Филиппов В.И. Некоторые вопросы сравнения СУБД // Математическое обеспечение информационных систем. М.: МГУ, 1985. С. 82–94.
52. Филиппов В.И. Теоретико-множественный подход к моделям данных // Материалы 3-й Всесоюз. конф. "Банки данных", ТПИ, Таллин, 1985. С. 16–25.
53. Филиппов В.И. Проблемы разработки многомашинной СУБД с обобщенной моделью данных // Обработка символьной информации. М.: ВЦ АН СССР, 1987. С. 5–11.
54. Филиппов В.И., Кузяков К. Опыт разработки распределенной библиотечной системы на основе Internet // Первая Российская конф. "Индустрия программирования" (тезисы и доклады). М., 1996. С. 62–70.
55. Серебряков В.А. Входной язык метапроцессора системы ЛОРД // Обработка символьной информации. Вып. 4. М.: ВЦ АН СССР, 1978. 12 с.
56. Бездушный А.Н., Серебряков В.А. Входной язык системы автоматизации построения трансляторов Супер. М.: ВЦ АН СССР, 1986. 60 с.
57. Бездушный А.Н., Лютый В.Г., Серебряков В.А. Разработка компиляторов в системе Супер. М.: ВЦ АН СССР, 1991. 102 с.
58. Бездушный А.Н., Лютый В.Г., Серебряков В.А., Ходатаев А.К. Система программирования Модуль-2-Супер. М.: ВЦ АН СССР, 1989. 102 с.
59. Надежин Д.Ю., Серебряков В.А., Ходукин В.М. Промежуточный язык Лидер (предварительное сообщение). Обработка символьной информации. М.: ВЦ АН СССР, 1987. 14 с.
60. Бездушный А.Н., Белов К.Г., Серебряков В.А. Синапс/3 — Расширение языка Си для параллельных вычислений при решении научных задач // Программирование. № 2. 1994.
61. Серебряков В.А. Модель и язык для параллельных вычислений при решении научных задач // ЖВМиМФ. Т. 33, № 7. 1993
62. Бездушный А.Н., Серебряков В.А. Трансляция циклов для многопроцессорных систем с распределенной памятью // Программирование. № 1. 1995.
63. Бездушный А.Н., Жижченко А.Б., Кулагин М.В., Серебряков В.А. Интегрированная система информационных ресурсов РАН и технология разработки цифровых библиотек // Программирование. № 4, 2000.
64. Интегрированная система информационных ресурсов: Архитектура, реализация, приложения / Под ред. В.А. Серебрякова. М. ВЦ РАН, 2004.
65. Абрамов С.А. Рациональная компонента решения линейного рекуррентного соотношения первого порядка с рациональной правой частью // ЖВМиМФ. 1975. № 4.
66. Abramov S.A., Petkověk M. Rational Normal Forms and Minimal Decompositions of Hypergeometric Terms // J. Symb. Comput. 2002. V. 33. P. 521–543.
67. Abramov S.A., Barkatou M.A. Rational Solutions of First Order Linear Difference Systems // Proc. of ISSAC, 1998.
68. Abramov S.A., Bronstein M. On Solutions of Linear Functional Systems Proc. // ISSAC, 2001.
69. Abramov S.A., M.Petkověk, Paule P.  $q$ -Hypergeometric solutions of  $q$ -difference equations // Discret. Math. 1998. V. 180.
70. Abramov S.A., van Hoeij M. Integration of Solutions of Linear Functional Equations // Integral transforms and Special Functions. 1999. V. 8. № 1–2.
71. Абрамов С.А., С.П.Царев. О периферийной факторизации линейных обыкновенных операторов // Программирование. 1997. № 1.
72. Abramov S.A., M.Petkověk. D'Alembertian Solutions of Linear Differential and Difference Equations // Proc. ISSAC'94, 1994.
73. Abramov S.A., Zima E.V. D'Alembertian Solutions of Inhomogeneous Linear Equations (differential, difference, and some other) // Proc. ISSAC'96, 1996.
74. Abramov S.A., M.Petkověk, A.Ryabenko. Special formal series solutions of linear operator equations // Discret. Math. 2000. V. 210.
75. Abramov S.A.  $m$ -Sparse Solutions of Linear Ordinary Differential Equations with Polynomial Coefficients // Discret. Math., 2000. V. 217.
76. Митчикина А.М., Рябенко А.А. Представление алгебраических функций в виде степенных и дробно-степенных рядов специального вида // Программирование. 2001. № 1. С. 10–17.

77. *Абрамов С.А., Кващенко К.Ю.* Наибольший общий делитель полиномов, зависящих от параметра // Вестник МГУ. Сер. 15. 1993. № 2.
78. *Abramov S.A., Bronstein M.* Hypergeometric dispersion and the orbit problem // Proc. of ISSAC, 2000.
79. *Abramov S.A.* When does Zeilberger's Algorithm Succeed? // Advances in Applied Mathematics. 2003. V. 30. P. 424–441.
80. *Abramov S.A., M.Petkověk.* On the structure of multivariate hypergeometric term // Advances in Applied Mathematics. 2002. V. 29. P. 386–411.
81. *Abramov S.A., Bronstein M., Khmel'nov D.E.* Regularization of linear recurrence systems // In Transactions of French-Russian A.M. Lyapunov Institute. MSU, 2003. V. 4. P. 158–171.

## ОТДЕЛ МЕХАНИКИ

*В.В. Аристов, С.Я. Степанов*

### Общие сведения

Отдел механики создан 1 января 1987 г. на основе объединения самостоятельного сектора теории устойчивости и механики управляемых систем В.В. Румянцева (ТУМУС), сектора кинетической теории газов Е.М. Шахова (КТГ) и сектора асимптотических методов в газовой динамике О.С. Рыжова (АМГД). Возглавил отдел чл.-корр. АН СССР В.В. Румянцев (ныне акад.). В настоящее время отдел механики состоит из двух секторов: ТУМУС и КТГ, сектор АМГД переведен в отдел механики сплошных сред. В 1995 г. обязанности заведующего сектором ТУМУС были возложены на А.В. Карапетяна. В секторе КТГ с 1995 г. по 2004 г. заведующим был Ф.Г. Черемисин и в настоящее время — В.В. Аристов. В 2002 г. заведующим отделом механики был назначен С.Я. Степанов. В.В. Румянцев, являясь советником РАН, продолжает принимать активное участие в работе сектора ТУМУС и отдела механики.

Научная работа сектора ТУМУС связана с развитием аналитических и численных методов теоретической механики и теории устойчивости движения и их применением в прикладных задачах. В настоящее время сектор состоит из девяти человек. Очень кратко тематика научной работы сотрудников сектора указана в таблице.

1.	Степанов С.Я.	зав. отд., д.ф.-м.н.	Устойчивость стационарных движений спутников
2.	Сергеев В.С.	вед. н.с., д.ф.-м.н.	Периодические движения, устойчивость систем с последствием
3.	Карапетян А.В.	вед. н.с., д.ф.-м.н.	Стационарные движения неголономных систем, инвариантные многообразия
4.	Буров А.А.	ст. н.с., к.ф.-м.н.	Вопросы существования первых интегралов в задачах динамики
5.	Сумбатов А.С.	ст. н.с., к.ф.-м.н.	Методы дифференциальной геометрии в механике, системы переменной структуры
6.	Аббаров Д.Л.	н.с., к.ф.-м.н.	Методы теории групп в теоретической механике
7.	Кожевников И.Ф.	м.н.с, к.ф.-м.н.	Динамика автомобильных шин
8.	Бучин В.О.	м.н.с.,	Области возможных движений спутника-гантели
9.	Хизгияев С.В.	инж.	Спутниковые тросовые системы

Сектор КТГ занят развитием аналитических и численных методов решения уравнения Больцмана, решением задач кинетической теории газов. В секторе семь человек. Тематика



научной работы сотрудников сектора указана в таблице:

1.	Аристов В.В.	зав. сект., д.ф.-м.н.	Кинетическая теория, уравнение Больцмана, численные методы
2.	Попов С.П.	вед. н.с., д.ф.-м.н.	Вычислительная гидродинамика, солитонные решения
3.	Черемисин Ф.Г.	вед. н.с., д.ф.-м.н.	Кинетическая теория, разреженные газы, численные методы решения уравнения Больцмана
4.	Шахов Е.М.	вед. н.с., д.ф.-м.н.	Модельные кинетические уравнения, динамика разреженного газа
5.	Ларина И.Н.	ст. н.с., к.ф.-м.н.	Динамика разреженного газа
6.	Рыков В.А.	ст.н.с., к.ф.-м.н.	Динамика разреженного газа, кинетическая теория, уравнение Больцмана
7.	Ильин О.В.	инж.	Кинетические и эволюционные уравнения

Далее остановимся подробнее на научной работе секторов ТУМУС и КТГ. Они имеют самостоятельную историю в ВЦ РАН, более глубокую, чем их история в составе отдела механики.

### **Сектор теории устойчивости и механики управляемых систем (ТУМУС)**

Тематика сектора ТУМУС начала формироваться после перехода в 1965 г. В.В. Румянцева из Института механики АН СССР в ВЦ АН СССР в лабораторию общей механики и гидродинамики Н.Н. Моисеева и публикации монографий Н.Н. Моисеева и В.В. Румянцева [1, 2]. Вокруг В.В. Румянцева образовалась группа, состоящая из его учеников, в основном выпускников аспирантуры механико-математического факультета МГУ. Первыми в этой группе были Р.С. Суликашвили и С.Я. Степанов (с 1966 г.). Впоследствии к ним присоединились В.Н. Рубановский (с 1967 г. по 1991 г.), Ван Дань-чжи (с 1968 г. по 1975 г.), В.С. Сергеев (с 1972 г.). В 1973 г. группа В.В. Румянцева была оформлена как самостоятельное подразделение — лаборатория ТУМУС, которая в 1985 г. была переименована в самостоятельный сектор ТУМУС. Позже в сектор ТУМУС вошли А.В. Карапетян (с 1975 г.), А.С. Сумбатов (с 1977 г.), А.А. Буров (с 1984 г.), Е.В. Аббарова (с 1994 г. по 1999 г.), А.С. Кулешов (с 1999 г. по 2001 г.), Д.Л. Аббаров (с 1999 г.), Н.Н. Титова (с 2000 г. по 2004 г.). И, наконец, в последнее время сектор ТУМУС дополнили молодые сотрудники В.О. Бучин (с 2001 г.), С.В. Хизгияев и И.Ф. Кожевников (с 2004 г.).

В.В. Румянцев является признанным мировым лидером в области аналитической механики и теории устойчивости движения. С его именем связана разработка теории устойчивости движения тел с полостями, содержащими жидкость, теория устойчивости по части переменных и другие основополагающие результаты в аналитической механике и динамике твердых тел. В выборе научной ориентации В.В. Румянцев и его ученики опираются на научные традиции Ляпунова и Четаева, отличающиеся безукоризненной строгостью постановок задач и методов решения и ясной механической интерпретацией результатов. В настоящее время В.В. Румянцев сосредоточил свои усилия на дальнейшем развитии общих методов аналитической механики. Им существенно развита теория Четаева, основанная на идее Пуанкаре использования групп Ли для описания движения механических систем.

Работы В.В. Румянцева получили высокую государственную оценку. В 1980 г. он был удостоен Государственной премии СССР за цикл работ по динамике твердых тел с полостями, содержащими жидкость, и в 1996 г. — Государственной премии Российской Федерации за цикл работ “Динамика тела на струне и смежные задачи”. В 1970 г. Валентин Витальевич был избран членом-корреспондентом АН СССР и в 1992 г. — действительным членом Российской Академии

наук. В 2004 г. он удостоен премии им. А.М. Ляпунова Президиума РАН за цикл работ по модификации и развитию метода функций Ляпунова в теории устойчивости и стабилизации движения по отношению к части переменных. В 1995 г. он был избран членом-корреспондентом Международной Астронавтической Академии, а затем, в 2000 г. — действительным членом этой Академии. В 1996 г. он удостоен премии фонда Александра Гумбольдта. В 1997 г. избран иностранным членом Сербской академии наук и искусств. В 1999 г. удостоен Международной премии К. и А.Г. Агостинелли по теоретической и прикладной механике и по математической физике Национальной академии наук Линчей (Рим, Италия). В 2003 г. избран членом Туринской академии наук.

Тематика работы сектора ТУМУС посвящена развитию и адаптации к современным исследовательским возможностям классических методов теории устойчивости и аналитической механики: развитие алгебраических основ теории Рауса, распространение теории Рауса на динамику систем переменной структуры и системы с деформируемыми элементами, численно-аналитические методы исследования устойчивости, методы исследования устойчивости решений интегродифференциальных и функциональных уравнений, систем с запаздыванием и т.д., аналитические и алгебро-геометрические методы исследования интегрируемости уравнений движения, развитие вариационных принципов механики и уравнений движения в групповых переменных. Полученные в секторе результаты часто являются пионерскими и вызывают волну последующих исследований в нашей стране и за рубежом. Особую роль играют работы по решению прикладных задач механики, таких как исследование существования и устойчивости равновесных ориентаций спутниковых систем с вращающимися и деформируемыми элементами и тросовыми связками, исследование устойчивости колебаний крыла в потоке газа, исследование устойчивости движения составных транспортных систем типа тягач-прицеп или тягач-полуприцеп и др.

Остановимся на циклах работ, которые можно рассматривать как новые направления исследований. Среди первых работ С.Я. Степанова и Р.С. Суликашвили были работы по динамике относительного движения спутников. С.Я. Степанову принадлежит большой цикл работ по стационарным движениям и устойчивости спутника-гиростата и управлению равновесной ориентацией с помощью системы роторов. В специальной полуобратной постановке решены задачи о трехосной и одноосной ориентации спутника в орбитальной системе координат. Недавние исследования С.Я. Степанова и А.А. Бурова показали, что управления равновесной ориентацией можно достичь также с использованием массивных тел, прикрепленных к спутнику с помощью тросов. Р.С. Суликашвили исследовал влияние симметрий высокого порядка (при равенстве квадратичных моментов инерции) в распределении масс на динамику и устойчивость спутника. С.Я. Степановым и Ван Дань-чжи была разработана теория устойчивости и стабилизации движения на конечном интервале времени и построены численно-аналитические алгоритмы исследования такой устойчивости. В.Н. Рубановский был одним из первых, кто в точной постановке исследовал устойчивость стационарных движений спутников с упругими стержнями. В.В. Рубановский вместе с В.В. Румянцевым входил в состав коллектива авторов, удостоенных в 1996 г. Государственной премии Российской Федерации за цикл работ “Динамика тела на струне и смежные задачи”.

Ранние работы В.С. Сергеева посвящены исследованию периодических движений тяжелого твердого тела с неподвижной точкой в случае, близком к случаю Лагранжа. В частности, при равенстве нулю одной из собственных частот найденные движения отвечают в невозмущенной задаче перманентным вращениям вокруг осей, лежащих в главной плоскости инерции тела, от которых отходят регулярные прецессии. Доказано существование двух трехпараметрических семейств периодических движений твердого тела и гиростата общего вида. Для твердого тела с произвольным распределением масс доказана устойчивость перманентных вращений вокруг главной оси инерции. Позже В.С. Сергеевым была разработана теория устойчивости по Ляпунову решений систем с последствием, описываемых интегродифференциальными уравнениями типа Вольтерра. Доказаны теоремы об устойчивости по первому приближению и теоремы об устойчивости в критических случаях одного нулевого и пары чисто мнимых корней характеристического уравнения. При условии асимптотической устойчивости доказана возможность представления общего решения рядами по степеням начальных значений с

экспоненциально стремящимися к нулю коэффициентами. Указан способ получения оценки области притяжения, основанный на использовании мажорант Ляпунова. В качестве одного из приложений проведено исследование асимптотической устойчивости и устойчивости при постоянно действующих возмущениях положения равновесия вязкоупругого крыла в нестационарном воздушном потоке. Построено общее решение в форме ряда.

А.В. Карапетяном разработана теория устойчивости движения систем с дифференциальными связями. В частности, обнаружен “диссипативный эффект”, связанный с возможностью асимптотической устойчивости стационарных движений консервативных механических систем, и эффект зависимости устойчивости от направления движения. Доказана корректность предельного перехода от систем с большим вязким трением к системам с дифференциальными связями на конечном интервале времени и при некоторых дополнительных условиях на бесконечном интервале времени. Классические результаты Рауса–Ляпунова–Сальвадори и Пуанкаре–Четаева–Смейла о существовании, устойчивости и бифуркации стационарных движений консервативных механических систем распространены на инвариантные множества консервативных и диссипативных систем. Дано полное исследование существования, устойчивости и ветвления стационарных движений тяжелого твердого тела на горизонтальной плоскости в случаях абсолютно гладкой и абсолютно шероховатой плоскости и плоскости с трением скольжения. Исследована динамика твердого тела с неподвижной точкой и твердого тела со струнным приводом с учетом сопротивления окружающей среды. Исследованы задачи динамики тела с жидкостью, в случаях тела с неподвижной точкой, тела со струнным приводом и тела на плоскости при различных гипотезах взаимодействия с плоскостью. Проведен параметрический анализ динамики трехмерного мобильного робота: найдены стационарные и периодические движения, исследованы их устойчивость и ветвление.

В ранних работах А.С. Сумбатова найдены конструктивные аналитические признаки существования скрытых циклических координат в голономных системах с двумя и тремя степенями свободы и линейных первых интегралов в неголономных системах. Для неголономных систем изучена обратная задача вариационного исчисления. Более поздний цикл работ посвящен исследованию механики систем с трением в рамках модели абсолютно твердого тела и закона трения Кулона. Дано развитие результатов магистерской диссертации Е.А. Болотова по исследованию движения плоской пластинки с трением. С помощью аналитических и численных методов исследована динамика ряда конкретных механических систем с трением. В частности, дано объяснение необычному поведению астрономического прибора, известного как “маятник Пошехонова”.

В работах А.А. Бурува исследован вопрос интегрируемости уравнений движения в задачах о колебаниях спутника на эллиптической орбите, о катании твердого тела по гладкой плоскости, в ряде задач динамики маятниковых систем. В задачах о катании твердого тела по гладкой плоскости, о движении тяжелого твердого тела на струне, о движении твердого тела в потоке частиц были найдены случаи существования дополнительного частного интеграла, аналогичного интегралу Гесса в задаче о движении тяжелого твердого тела вокруг неподвижной точки. Некоторые из этих результатов распространены на случай односторонних связей.

Интересны также недавние результаты молодых сотрудников сектора. Е.В. Абраровой получена классификация равновесных конфигураций, их устойчивости и бифуркации для спутника, состоящего из сосредоточенных масс и стержней, с учетом точного выражения ньютоновского потенциала. А.С. Кулешов получил явный вид линейных по обобщенным скоростям интегралов в задаче о движении тела вращения по шероховатой плоскости. Н.Н. Титова составила полный атлас симметричных периодических движений спутника в окрестности точек либрации ограниченной плоской эллиптической фотогравитационной задачи трех тел.

Кроме основных сотрудников в совместных исследованиях сектора, проводимых по трудовым соглашениям в рамках проектов РФФИ, гранта Президента РФ “Ведущие научные школы” и проекта ФЦП Интеграция принимает участие большое число ученых, аспирантов и студентов, работающих в МГУ, УлГУ, ИПУ, МГУС, МГАПИ. Отметим лишь некоторые из направлений их совместной с сектором ТУМУС работы. Новое важное направление исследования устойчивости решений неавтономных нелинейных систем дифференциальных и функционально-дифференциальных уравнений развивается А.С. Андреевым (УлГУ) и его

учениками. В.Н. Тхаем (ИПУ РАН) с учениками разрабатывается теория симметричных периодических движений обратимых систем. Найдены периодические движения, и исследована их устойчивость в задаче движения твердого тела вокруг неподвижной точки, в задаче о катании тела по шероховатой поверхности, в задаче о колебаниях спутника на эллиптической орбите, в фотогравитационной задаче трех тел и в других задачах. И.И. Косенко (МГУС) разработал специальную методику использования программных средств с интегрированным модулем численно-аналитического анализа дифференциально-алгебраических уравнений для моделирования движения взаимодействующих твердых и упругих тел с учетом чередования режимов свободного движения, качения, скольжения и ударов. С помощью этой методики в классической задаче о движении кельтского камня были выявлены не только хорошо известные потеря устойчивости и изменение направления вращения, но и перевороты и подскоки.

Сотрудники сектора ТУМУС принимают активное участие в организации и проведении многочисленных национальных и основных международных форумов по механике и устойчивости движения. В.В. Румянцев был председателем или членом научного комитета всех Четаевских конференций "Проблемы аналитической механики и управления движением", председателем секции "Аналитическая механика и устойчивость движения" Всесоюзных съездов по теоретической и прикладной механике, руководителем ряда Международных симпозиумов по классической и небесной механике (Великие Луки), в организации и проведении которых активное участие принимали сотрудники сектора ТУМУС. В.В. Румянцев, С.Я. Степанов, В.С. Сергеев, А.В. Карапетян, А.С. Сумбатов входят в состав членов Российского Национального комитета по теоретической и прикладной механике. В.В. Румянцев является главным редактором журнала "Прикладная математика и механика", а С.Я. Степанов и А.В. Карапетян участвуют в издании журнала. В.В. Румянцев, С.Я. Степанов, А.В. Карапетян, А.А. Буров неоднократно читали лекции в качестве приглашенного профессора в ведущих европейских университетах. Свидетельством актуальности и значимости проводимых исследований является также приток в сектор отечественной и зарубежной научной молодежи. Стажировки иностранных студентов в секторе ТУМУС получают высокие оценки в европейских институтах.

С некоторыми направлениями работ сектора ТУМУС можно познакомиться по приведенному ниже списку монографий и обзору работ, опубликованных в издаваемом в секторе сборнике "Задачи исследования устойчивости и стабилизации движения".

### Список монографий сектора ТУМУС

1. Моисеев Н.Н., Румянцев В.В. Динамика твердых тел с полостями, содержащими жидкость. М.: Наука, 1965.
2. Румянцев В.В. Об устойчивости стационарных движений спутников. М.: ВЦ АН СССР, 1967.
3. Rumyantsev V.V. Dynamics and Stability of Rigid Bodies. Roma: Edizioni Cremonese, 1972.
4. Карапетян А.В., Румянцев В.В. Устойчивость консервативных и диссипативных систем. Итоги науки и техники. Общая механика. Т.6. М.: ВИНТИ, 1983. 132 с.
5. Румянцев В.В., Озиранер А.С. Устойчивость и стабилизация движения по отношению к части переменных. М.: Наука, 1987.
6. Рубановский В.Н., Самсонов В.А. Устойчивость стационарных движений в примерах и задачах. М.: Наука, 1988.
7. Karapetyan A. V. Stability of steady motions of mechanical systems. Publ. du Depart. Math. Fac. Univ. Namur. 1989. 57 p.
8. Karapetyan A.V., Rumyantsev V.V. Stability of conservative and dissipative systems. Applied Mechanics Soviet Reviews. V.I: Stability and Analytical Mechanics. New York: Hemisphere, 1990. P. 1-144.
9. Карапетян А.В. Устойчивость стационарных движений. М.: Эдиториал УрСС, 1998. 165 с.
10. Karapetyan A. V., Rumyantsev V.V., et. al. Modern Methods of Analytical Mechanics and Applications. Wien-New York: Springer-Verlag, 1998. Hemisphere. P. 1-144.
11. Сумбатов А.С., Юнин Е.К. Очерки о трении. М.: ВЦ РАН, 2000. 141 с.
12. В.И. Воронников, В.В. Румянцев. Устойчивость и управление по части координат фазового вектора динамических систем: теория, методы и приложения". М.: Научный мир, 2001. 320 с.
13. Румянцев В.В., Сергеев В.С., Степанов С.Я., Сумбатов А.С. Сборник "Задачи исследования устойчивости и стабилизации движения". Обзор 1975-2000 гг. Ч. I // Проблемы нелинейного анализа в инженерных системах. Казань: Абак, 2004. Т. 10. Вып. 1(20). С. 113-137.

14. Румянцев В.В., Сергеев В.С., Степанов С.Я., Сумбатов А.С. Сборник “Задачи исследования устойчивости и стабилизации движения”. Обзор 1975–2000 гг. Ч. II // Проблемы нелинейного анализа в инженерных системах. Казань: Абак, 2004. Т. 10. Вып. 2(20). С. 72–94.

Более подробную информацию о секторе ТУМУС, сотрудниках и их работах можно получить на сайте ВЦ РАН <http://ccas.ru/>, а также на сайте <http://chetaev.msu.ru/school.html>, посвященном школе Н.Г. Четаева.

### Сектор кинетической теории газов (КТГ)

Сектор КТГ был образован в ВЦ АН СССР 9 января 1965 г. (первоначально сектор КТГ назывался “Лаборатория математических методов теории разреженных газов”). Его руководителем был А.А. Никольский, выдающийся ученый в области аэродинамики и кинетической теории газов. Сотрудниками сектора стали его молодые ученики и аспиранты, пришедшие вместе с ним из Института механики АН СССР (до 1965 г. А.А. Никольский был директором Института механики): И.О. Власов, И.Н. Ларина, Е.Ф. Лимар, А.А. Пярнпуу, В.А. Рыков, Ф.Г. Черемисин, Т.И. Чуканова, Е.М. Шахов, В.П. Шидловский. Интерес к динамике разреженного газа был связан во многом с началом космических полетов, развитием новых, в том числе вакуумных технологий, а также в связи с появлением быстродействующей вычислительной техники. Первые расчеты проводились на ЭВМ “Стрела” со сравнительно слабыми вычислительными ресурсами. Существенное продвижение реализация численных методов решения задач разреженных газов получила после появления в ВЦ АН СССР ЭВМ БЭСМ-6.

Развивающаяся вычислительная техника стимулировала поиск прямых методов решения уравнения Больцмана, лежащего в основе кинетической теории и являющегося сложным нелинейным интегро-дифференциальным уравнением. Это научное направление было отмечено директором ВЦ акад. А.А. Дородницыным как одно из престижных направлений для ВЦ и для отечественной науки. Пионерские для нашей страны и одни из первых в мире расчеты уравнения Больцмана были выполнены Ф.Г. Черемисиным. Косвенную поддержку этим исследованиям, которые многим тогда казались бесперспективными, оказали опубликованные несколько ранее решения уравнения Больцмана, полученные группой Нордсика на суперкомпьютере ИЛИАК в Иллинойсе, США. Существенно, что до сих пор работы Ф.Г. Черемисина и его последователей остаются одними из самых продвинутых в мире. В 2004 г. Ф.Г. Черемисин был приглашен докладчиком на 24-м Международном симпозиуме по динамике разреженных газов в г. Бари, Италия с докладом “Прямое решение уравнения Больцмана”. Наиболее слабым звеном отечественных ЭВМ в то время была малая оперативная память. В первом варианте метода Ф.Г. Черемисина этот недостаток преодолевался ценой значительного увеличения объема вычислений и позволял получить 2–3 последовательных приближения.

Е.М. Шаховым было предложено другое направление исследований, связанное с развитием и использованием кинетических уравнений с упрощенным интегралом столкновений — модельным интегралом. Это позволило решить ряд достаточно сложных аэродинамических задач обтекания тел. Была построена процедура последовательности уточняющих моделей. Первое приближение, так называемое S-модельное уравнение, обеспечивает в отличие от известной модели ВГК правильное число Прандтля. Модель Шахова получила признание в нашей стране и за рубежом и не потеряла актуальности и в настоящее время.

Начиная с работ А.А. Никольского, важной частью исследований, существенно дополнявших численные методы, был поиск аналитических закономерностей, точных частных решений и полуаналитических подходов. В.И. Рыков нашел точное решение простейшей изотропной задачи, которая могла выступать в качестве тестовой, и предложил новое модельное уравнение для одномерных течений. Для задач обтекания летательных аппаратов двухатомным газом (воздухом) им было построено модельное кинетическое уравнение, учитывающее вращательные степени свободы молекул. В дальнейшем В.И. Рыков (частично совместно с И.Н. Лариной) усовершенствовал уравнения кинетических процессов для молекул с внутренними степенями свободы. Одно из основных направлений исследований В.А. Рыкова — развитие численных методов и решение задач разреженного газа с помощью модельных уравнений. С помощью модельного кинетического уравнения ВГК И.Н. Лариной впервые были решены весьма сложные для того времени стационарные задачи обтекания сферы одноатомным газом при умеренных и больших числах Кнудсена и различных числах Маха.

В подходе прямого решения уравнения Больцмана, разрабатываемом Е.Ф. Лимаром, интегралы столкновений аппроксимировались полиномами. Здесь сказалось определенное воздействие метода Шахова, используемого при построении последовательности приближающих модельных уравнений. При вычислении интеграла столкновений Е.Ф. Лимаром была отмечена важность свойства кинетической (микроскопической) консервативности. Он получил несколько решений уравнения Больцмана вплоть до двумерных задач о поперечном обтекании пластины.

В 1967 г. произошли организационные изменения — заведующим был назначен О.С. Рыжов и сектор был переименован в лабораторию теории процессов переноса. В 1989 г. лаборатория была разделена на два сектора КТГ и АМГД, которые вошли в состав отдела механики. В рамках лаборатории теории процессов переноса проходили плодотворные дискуссии специалистов в различных областях газовой динамики, кинетической теории, прикладной математики, занимающихся численными и аналитическими методами. Сотрудники одновременно участвовали в работе по нескольким направлениям исследований. В.И. Жук был аспирантом Е.М. Шахова, кроме этого выполнил ряд работ по изучению течений разреженного газа в сотрудничестве с О.С. Рыжовым и Е.Д. Терентьевым и затем переориентировался на исследование проблемы устойчивости в газовой динамике. Сейчас В.И. Жук является заведующим сектором асимптотических методов в газовой динамике отдела механики сплошных сред. Нельзя не упомянуть и других сотрудников: В.Н. Диесперова, А.М. Бишаева, Ю.И. Ромашкевича, М.И. Градобоева, И.В. Савенкова, А.И. Державину, лаборантов Н.К. Сеницыну и Е.А. Филиппину, принимавших участие в работе лаборатории в разные годы.

А.А. Пярнпуу и В.П. Шидловский работали в лаборатории теории процессов переноса до середины 70-х годов (затем они перешли в лабораторию акад. О.М. Белоцерковского). Одно из направлений исследований А.А. Пярнпуу — изучение взаимодействия газов с поверхностью, являющееся важным аспектом кинетической теории газов. Определение физически обоснованных граничных условий на границе с твердым телом и до сих пор является еще во многом неисследованной проблемой. В то время эти работы [2] были одними из первых в этой области. Научные интересы В.П. Шидловского были связаны с различными задачами газовой динамики и кинетической теории [3].

С.П. Попов стал сотрудником лаборатории теории процессов переноса после окончания аспирантуры ВЦ АН СССР в 1972 г. Его исследования чрезвычайно многообразны. Им были исследованы газодинамические задачи о движении газа с учетом вязкости и теплопроводности под действием сходящихся поршней (совместно с В.П. Пархоменко и А.А. Махмудовым), изучены процессы обтекания при движении в атмосфере метеорных тел с гиперзвуковыми скоростями в режиме интенсивного лучистого теплообмена, установлена структура дальнего следа, определены характеристики волн цунами, вызванных падением астероидов и комет. С.П. Попов принимал участие в расчетах двумерных струйных течений газа в сложных геометрических областях, а также течений несжимаемой жидкости между двумя сферами. Совместно с сотрудниками спецсектора Института физики Земли АН СССР он участвовал в работах по изучению процесса испарения с поверхности твердого тела под действием излучения оптического квантового генератора. В соавторстве с В.И. Жуком опубликовал ряд работ, посвященных процессам развития длинноволновых возмущений в пограничном слое с самоиндуцированным давлением. С 1988 г. С.П. Попов занимался разработкой численных методов решения солитонсодержащих уравнений гидродинамического типа, которые были им применены для исследования уравнений Кортевега-де Фриза, Бенджамина-Оно, Кадомцева-Петвиашвили, Лидке-Спачека, Богдавленского-Вольтерра и др. (по этой тематике им была защищена докторская диссертация). В последнее время совместно с Ф.Г. Черемисиным он проводил исследования различных течений газа на основе схем, сочетающих численную аппроксимацию уравнений Больцмана и Навье-Стокса.

В 70-х – 80-х гг. развивались теоретические принципы построения численных схем кинетической теории, расширялся класс решаемых задач. Ф.Г. Черемисиным были предприняты попытки решения двумерных задач. Сама демонстрация возможности получения таких решений имела большое значение, но точность оказалась невысокой. Важным шагом в повышении надежности решений явился предложенный В.В. Аристовым и Ф.Г. Черемисиным консервативный метод расщепления решения уравнения Больцмана (В.В. Аристов был аспирантом Е.М. Шахова и

Ф.Г. Черемисина, а с 1977 г. стал сотрудником лаборатории). Консервативная коррекция решения перераспределяла ошибку вычислений (в случае смеси газов перераспределение проводилось и между компонентами) так, чтобы обеспечить сохранение массы, импульса и энергии. При этом ошибка, вносимая процедурой коррекции, не превышала аппроксимационной погрешности схемы. С помощью этого метода было решено большое число задач для однокомпонентного газа и для смеси газов [4]. Надежные решения, полученные для одномерных классических задач о структуре ударной волны и о теплопередаче, опережали зарубежные аналоги.

Были сформулированы две концепции консервативности для кинетических уравнений: гидродинамической (макроскопической) и кинетической (микроскопической). В гидродинамической концепции разностная схема строится, исходя из аппроксимации первых пяти моментных уравнений, следующих из уравнения Больцмана. Проще всего такой подход реализуется в консервативном методе расщепления. Кинетическая концепция требует обеспечения выполнения законов сохранения непосредственно для интеграла столкновений, где фигурируют функции распределения только одного временного слоя (одной итерации). Такой подход, по сути дела, заложен в методах статистического моделирования и рассматривался Е.Ф. Лимаром и в последние годы Ф.Г. Черемисиным. Предложенный Ф.Г. Черемисиным метод позволил построить эффективные вычислительные алгоритмы для моделирования течений разреженного газа в широком диапазоне физических параметров, для любых молекулярных потенциалов и задач различной размерности. Обе концепции имеют свои достоинства и недостатки. Микроскопическая консервативность отражает законы сохранения на дискретном уровне при столкновениях частиц, не внося дополнительных ошибок, как при коррекции. Существенным преимуществом гидродинамической консервативности является возможность использования неявных схем, что особенно важно при малых числах Кнудсена, когда система уравнений, решаемых с использованием процедуры дискретных скоростей, становится жесткой.

В.В. Аристовым был предложен новый метод решения уравнения Больцмана, где для кусочно-постоянной аппроксимации в пространстве скоростей удается провести точное интегрирование по углам столкновения в операторе столкновений, что позволило построить простую аппроксимацию интегралов столкновений; консервативность в данном подходе обеспечивалась упомянутой выше коррекцией.

Консервативный метод расщепления естественно привел к построению в начале 80-х гг. асимптотических кинетических схем для аппроксимации гидродинамических уравнений. Схемы В.В. Аристова и Ф.Г. Черемисина приближают уравнения Эйлера: разлет + максвеллизация или уравнения Навье–Стокса: разлет + трансформация в приближенную функцию распределения по методу Чепмена–Энскога (как оказалось, схемы для уравнения Эйлера фактически совпали с аналогичными схемами, разрабатываемыми независимо в различных странах, схемы для уравнений Навье–Стокса оказались первыми кинетическими схемами такого рода). В последние годы интерес к кинетическим методам существенно вырос, в частности из-за возможности ставить реалистические кинетические граничные условия. При этом можно различать схемы собственно для функции распределения и для макроскопических параметров (кинетически согласованные схемы).

Проблема перехода от разреженного газа к сплошной среде в рамках кинетического подхода чрезвычайно важна. Основная идея метода, предложенного В.А. Рыковым на основе модельных уравнений, состояла в использовании уравнений сохранения, замкнутых при помощи итерационной интегральной формы кинетических модельных уравнений. В.А. Рыковым совместно с А.М. Бишаевым и Е.Н. Деминой были развиты численные методы решения стационарных задач разреженного газа во всем диапазоне чисел Кнудсена.

Одним из возможных описаний течений, близких к течению сплошной среды, является использование различных уравнений в разных областях течения. Метод совместного решения уравнений Больцмана и Навье–Стокса, разработанный С.П. Поповым и Ф.Г. Черемисиным, дал существенный выигрыш во времени счета по сравнению с решением уравнения Больцмана во всей области течения и расширил область применения уравнений Навье–Стокса за счет правильной постановки граничных условий на границе твердого тела, где может быть сильная неравновесность газа.

Е.М. Шаховым и В.В. Аристовым были изучены течения при больших числах Маха. В случае предельно малой температуры функция распределения рассматривалась как дельта-функция, что характерно для сильных выбросов газа, молекулярных пучков и т.д. Весьма интересным является появление в таких задачах решений типа бегущих волн.

В.И. Рыковым и И.Н. Лариной были разработаны численные итерационные методы для стационарных задач обтекания тел потоком как одноатомного, так и двухатомного газов. Ими построены новые граничные условия для двухатомного газа, взаимодействующего с поверхностью твердого тела, сформулированы законы подобия гиперзвуковых течений разреженного газа. В рамках проекта “Буран” было рассчитано тепловое взаимодействие летательного аппарата с гиперзвуковым потоком двухатомного газа.

В.А. Рыковым построено кинетическое уравнение Больцмана для химически реагирующего газа. На его основе совместно с В.А. Мацуком развито обобщение метода Чепмена-Энскога и дан вывод уравнений сплошной среды для смеси химически реагирующих газов. Совместно с А.М. Бишаевым определены вариационные принципы Онзагера для линейного уравнения Больцмана. Получены законы сохранения, которые управляют изменением среднего радиуса облака газа при его разлете в пустоту.

Для моделирования реальных газов необходимо было развить методы решения обобщенных кинетических уравнений, учитывающих переход внутренней энергии в энергию поступательного движения. Таким уравнением является уравнение Ванг Чанг–Уленбека, где рассмотрение различных квантовых уровней позволяет получить систему кинетических уравнений, как в случае смеси газов. Это уравнение сложнее уравнения Больцмана, но его возможно решить на современных компьютерах. Метод решения уравнения Ванг Чанг–Уленбека, обобщающий консервативный метод решения уравнения Больцмана, впервые был предложен Ф.Г. Черемисиным.

В результате многолетней работы Е.М. Шаховым и его последователями был существенно расширен класс задач, решаемых на основе S-модельного уравнения, была повышена точность и изучены новые возможности решения, особенно для околосплошносредных режимов течения. Е.М. Шаховым был разработан консервативный конечно-разностный метод второго порядка точности, изучены нестационарные течения газа, вызванные испарением с поверхности плоской пластины, кругового цилиндра и сферы при различных значениях коэффициента аккомодации, исследованы внутренние течения в каналах и трубах, рассмотрен вопрос о пределах применимости одномерной теории в течениях типа Пуазейля.

На основе метода прямого решения уравнения Больцмана в конце 80-х — начале 90-х гг. были получены решения двумерных задач, которые хорошо согласовывались с экспериментальными данными. Например, было изучено отражение ударной волны от клина и выяснены условия нерегулярного (маховского) отражения. Исследованы задачи о течениях в элементах криовакуумной техники с граничными условиями, моделирующими конденсацию и испарение [4]. Были получены первые решения трехмерных задач. В это время появились отечественные экспериментальные данные по структуре неустойчивых недорасширенных струй и в секторе было начато изучение задач о свободных струях. Решение этих задач облегчается ввиду отсутствия для основного пространства течения граничных условий на твердой стенке. Для таких задач была изучена неустойчивость течений при малых числах Кнудсена.

В конце 80-х гг. В.В. Аристов высказал гипотезу о возможности описания перехода к неустойчивости и турбулентности в газе с помощью уравнения Больцмана. Предполагается, что неустойчивые нестационарные решения могут существенно отклоняться от равновесия, что обуславливает интенсивный перенос импульса и энергии, характерный для турбулентных течений. В середине 90-х гг. были получены первые неустойчивые решения уравнения Больцмана для трехмерных струйных течений в закритическом режиме с турбулентными пульсациями. По характерной частоте и масштабу амплитуды пульсаций расчеты согласовывались с экспериментом. Был выявлен механизм неустойчивости, связанный с потерей осесимметричного характера течения и появления продольных вихревых структур типа Тейлора–Гертлера. Проводилась проверка того, что данные решения не являются следствием численной неустойчивости. Однако эта сложная проблема требует дальнейшего всестороннего исследования.

Такие задачи оказались актуальными, поскольку в 90-х гг. изучение неустойчивости было начато на основе методов статистического моделирования и позже на основе модельных кинетических уравнений. С уменьшением числа Кнудсена стационарное течение газа около



тела теряет устойчивость, и обтекание происходит в нестационарном режиме. В.А. Рыковым и И.Н. Лариной были разработаны методы расчета нестационарных течений газа при малых числах Кнудсена. Эти методы основаны на использовании как модельных кинетических уравнений, так и линеаризованного уравнения Больцмана. В последнее десятилетие этими методами решены задачи с потерей устойчивости потока и образованием вторичных вихревых течений.

В 80–90-е гг. В.В. Аристовым были поставлены задачи о неоднородной релаксации со специфичным кинетическим описанием неравновесных нелинейных процессов. В простейшей модели открытой системы неоднородная неравновесная проточная структура на масштабе длины свободного пробега поддерживается за счет задания неравновесных граничных условий. В случае одноатомного газа была выявлена (аналитически и численно) интересная закономерность — потоки тепла имеют тот же знак, что и градиент температуры. Такой же аномальный характер имеет соотношение между компонентами тензора неравновесных напряжений и градиентами скорости. В случае экспериментального подтверждения откроется возможность интересных приложений.

В.В. Аристовым, И.Г. Мамедовой, С.А. Забелоком и А.А. Фроловой были предложены алгоритмы параллельных вычислений по схеме прямого решения уравнения Больцмана (с использованием изначальной однородности используемых схем) по физическому или скоростному пространству.

Упомянем также работы, прямо не относящиеся к тематике сектора, но имеющие черты, характерные для кинетико-статистического метода. Ф.Г. Черемисиним было получено решение уравнений Смолуховского–Эйнштейна для дисперсных сред, где аналогично решению уравнения Больцмана рассчитывался процесс коагуляции водяных капель в дождевом облаке и были получены хорошо согласующиеся с экспериментом результаты. Можно также отметить цикл работ В.В. Аристова по построению статистических моделей пространства-времени.

В целом работы сотрудников сектора кинетической теории газов получили признание в нашей стране и за рубежом. Методы и отдельные результаты помимо нашей страны использовались в Германии, Италии, США, Польше, Японии, Китае и в других странах. В последние годы сотрудники сектора вместе с коллегами из США участвуют в совместном проекте по разработке единого кинетического метода решения уравнения Больцмана на основе развитых в секторе методов.

### Список монографий сектора КТГ

1. Шахов Е.М. Метод исследования движений разреженного газа. М.: Наука, 1974. 208 с.
2. Пярнпуу А.А. Взаимодействие молекул газа с поверхностью. М.: Наука, 1974. 192 с.
3. Шидловский В.П. Введение в динамику разреженных газов. М.: Наука, 1965. 218 с.
4. Аристов В.В., Черемисин Ф.Г. Прямое численное решение кинетического уравнения Больцмана. М.: ВЦ РАН, 1992. 192 с.
5. Aristov V.V. Direct methods for solving the Boltzmann equation and study of nonequilibrium flows. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2001. 312 p.

Более подробную информацию о секторе КТГ, сотрудниках и их работах можно получить на сайте ВЦ РАН <http://ccas.ru/>.

## ОТДЕЛ ПРОБЛЕМ МОДЕЛИРОВАНИЯ

*А.П. Абрамов, П.П. Корявов*

---

В 1982 г. при изменении структуры отдела Н.Н. Моисеева входившие в него два сектора: экономического моделирования, которым руководил Ю.П. Иванилов, и математического моделирования водных систем, которым руководил П.П. Корявов, — были объединены в новый отдел проблем моделирования, руководителем которого был назначен Ю.П. Иванилов.

### **Сектор экономического моделирования**

Спектр научных интересов выдающегося ученого, профессора, доктора физ.-матем. наук Ю.П. Иванилова (1931–1995), отдавшего Вычислительному центру свыше 30 лет жизни, был очень широк. Свою научную деятельность он начал в 50-е гг. прошлого века под руководством Н.Н. Моисеева как исследователь ряда задач теоретической гидромеханики, где получил ряд впечатляющих результатов.

Далее основными научными интересами Ю.П. Иванилова стали исследование операций, системный анализ, теория оптимального управления, математическая экономика.

Здесь следует отметить основополагающую работу Ю.П. Иванилова по системному анализу, написанную им в соавторстве с будущим академиком А.А. Петровым [1]. В этом сборнике опубликована также другая выдающаяся работа этих же авторов под названием “Динамическая модель расширения и перестройки производства ( $\pi$ -модель)”, в которой построена и проанализирована многосекторная динамическая модель развития и перестройки производства. Эта работа послужила толчком к развитию целого направления экономико-математических исследований в Советском Союзе, она многократно цитировалась различными авторами.

Существенный вклад Ю.П. Иванилов внес в теорию динамического линейного программирования. Эти исследования составили основу его докторской диссертации, которую он успешно защитил в 1975 г.

Ю.П. Иванилов был на протяжении нескольких лет деканом факультета управления и прикладной математики Московского физико-технического института. Его преподавательская деятельность отражена в двух широко известных учебниках, написанных им совместно с коллегами по МФТИ и Вычислительному центру [2].

Результатом работы в области эконометрики Ю.П. Иванилова, его коллег и учеников стала серия публикаций по анализу производственной функции экономики Советского Союза, а также взаимосвязи энергетики и производительности труда [3–5].

Ю.П. Иванилов воспитал многочисленную плеяду учеников, которые плодотворно работают по всей России от Карелии до Дальнего Востока, а также на Украине, в Казахстане, Молдове, Киргизии и Таджикистане.

После безвременной кончины Ю.П. Иванилова осенью 1995 г. отдел проблем моделирования и сектор экономического моделирования возглавил его ученик, доктор физ.-матем. наук А.П. Абрамов. Его научными интересами являются применение топологических методов в теории оптимизации [6], а также изучение взаимосвязей между магистральной теорией и проблемами реальной экономики [7]. Дело в том, что традиционная магистральная теория неявно предполагает существование единого управляющего центра, который планирует производственную деятельность всех отраслей многосекторной экономики, а также организует межотраслевое взаимодействие. Отрасли обязаны своевременно и полностью выполнять все распоряжения этого центра. Поскольку в рыночной экономике такого координирующего центра нет, а магистральный режим функционирования экономической системы является наиболее эффективным, то представляется весьма актуальным исследование возможных механизмов функционирования децентрализованной экономики в этом режиме. Оказалось, что такие механизмы существуют, причем они имеют естественное экономическое обоснование.

Ведущий научный сотрудник сектора экономического моделирования, доктор физ.-матем. наук, профессор В.В. Дикусар является признанным авторитетом в теории оптимального управления, а также вычислительной математики. Он и его многочисленные ученики решили ряд важных прикладных задач в области авиации, экономики, космоса, кораблевождения, металлургии, экологии, химической кинетики, финансовой математики.

Основное направление теоретических работ В.В. Дикусара — необходимые условия экстремума нерегулярной ситуации (задачи типа узких мест). В последние годы он получил важные и оригинальные результаты по численным методам (эффективные методы решения плохо обусловленных задач линейного и квадратичного программирования, плохо обусловленных систем линейных уравнений, жестких систем обыкновенных дифференциальных уравнений и сингулярно возмущенных систем) и по проблеме синтеза управлений (предложены методы синтеза без использования уравнений Риккати). Им сформулированы и доказаны теоремы существования и единственности для канонической задачи Дубовицкого–Милютина [8–9].

Для задач оптимального управления, линейных по фазовым координатам, В.В. Дикусар предложил и реализовал программно методы оценки геометрии (множества активных индексов) оптимальной траектории при наличии ограничений общего вида.

В последние годы В.В. Дикусар активно работает в области экономико-математического моделирования [10].

Профессор В.В. Дикусар подготовил 10 докторов и 14 кандидатов наук, преподает по совместительству на кафедре высшей математики МФТИ.

Работающий в секторе ведущий научный сотрудник, доктор физ.-матем. наук В.Н. Разжевайкин имеет широкий спектр научных интересов. Он автор теории, описывающей взаимосвязь устойчивости и эволюционной оптимальности в распределенных биологических системах. На ее основе сформулированы условия эволюционной оптимальности в биологических системах, наделенных возрастной и пространственной структурой.

Другим его достижением является построение теории корреляционной адаптометрии, позволяющей на основе применения статистических методов оценивать состояние изучаемой группы биологических объектов с точки зрения степени их приспособленности к воздействиям факторов окружающей среды. На основе этой теории В.Н. Разжевайкин в сотрудничестве со специалистами из профильных НИИ провел ряд практических исследований по установлению характера воздействия отдельных факторов на обследованную биологическую группу. В задачах медицинского характера в качестве таких факторов выступают преимущественно те или иные лекарственные препараты, а в качестве групп — пользующиеся ими группы пациентов.

В.Н. Разжевайкиным были построены математические модели, основанные на использовании систем уравнений типа реакция–диффузия, описывающие распространение популяционных волн в пространственно распределенных биологических системах. В этих исследованиях были получены аналитические и численные результаты, определяющие характер таких волн, их скорость, а также условия их возникновения и взаимодействия между собой и внешними препятствиями. Для моделей такого типа выявлены также условия существования и характер возникающих пространственно неоднородных структур. Результаты были использованы для описания структуры растительных сообществ в моделях проточных водоемов.

Под руководством В.Н. Разжевайкина была создана математическая модель распространения инфекционного заболевания в популяции, структурированной по факторам эпидемического риска. На ее основе с использованием имевшихся фактических данных выявлены условия и получены оценки прогноза распространения ВИЧ-инфекции для России и ряда стран Африки.

Из ранних результатов В.Н. Разжевайкина следует отметить построение ряда моделей для оценки количества и характера климатических изменений вследствие химических выбросов в условиях различных сценариев антропогенного воздействия на окружающую среду. Эти модели использовались при оценивании масштабов выпадения кислотных дождей в условиях глобального ядерного конфликта и в формулировке задачи управления концентрацией двуокиси углерода в целях локализации модельной траектории внутри климатического окна.

Наконец, следует упомянуть о разработанной им математической модели, предназначенной для расчета изменения рефракции глаза после операции сквозной кератопластики в условиях

малых расхождений параметров донора и реципиента. Оценки, полученные на основе расчетов по этой модели, используются при планировании комплексных глазных операций.

Ведущий научный сотрудник сектора, доктор физ.-матем. наук Д.А. Саранча занимается математическим моделированием эколого-биологических объектов.

Основная цель его исследований состоит в создании комплексов взаимосвязанных моделей экологических и физиологических систем (в том числе для исследования биоценотических сообществ и сопряженных с ним объектов), изучении возможностей использования эволюционных уравнений для их описания. Исследования основываются на вычислительных экспериментах, анализе систем обыкновенных дифференциальных уравнений, уравнений в частных производных и разностных уравнений.

Д.А. Саранча разработал методику моделирования эколого-биологических явлений, основанную на комплексном подходе: от обработки исходной информации об объекте до обоснования набора взаимодополняющих моделей и проведения на его основе анализа изучаемого явления. Ее эффективность показана на примере построения комплекса математических моделей тундровых популяций и сообществ. В рамках предложенной методики разработана система математических моделей, описывающая трехуровневое сообщество (растительность – грызуны – хищники), состоящая из имитационной модели и совокупности моделей этого сообщества разной степени детализации. Применение разработанной методики для анализа формирования колебаний численности тундровых животных позволили сформулировать гипотезы о ведущих механизмах формирования релаксационных колебаний численности популяций тундровых животных с чередованием максимумов численности через 3–4 года, характерных для тундровых зон России от Кольского полуострова до Чукотки.

Д.А. Саранча возглавлял работы по построению и анализу математических моделей, учитывающих индивидуальные свойства особей и характер их пространственных взаимодействий. Вычислительные эксперименты с этими моделями продемонстрировали динамику численности животных, близкой к наблюдаемой в природе, получены адекватные картины заселения областей обитания. Проведен анализ характера распространения эпидемии внутри популяции взаимодействующих животных.

Под руководством Д.А. Саранчи предложен новый подход к исследованию зависимости динамических режимов, возникающих в системе “реакция – диффузия”. Показано, что при определенных условиях возникают неоднородные по пространству и времени решения (“экологические диссипативные структуры”). Проведена классификация зависимости условий возникновения бифуркационных решений от безразмерных параметров модели. Выделены области изменения параметров, приводящих к различным типам бифуркационных решений. Подробно исследована модель типа “хищник – жертва” с постоянными коэффициентами рождаемости и смертности и монотонной трофической функцией.

На основе подходов статистической механики построен ряд макромоделей экологических и нейрофизиологических систем. Для модели сообщества из двух трофических уровней, каждый из которых состоит из большого числа видов, при ряде предположений статистического характера на начальные распределения биомасс видов и их параметров получены уравнения динамики суммарных биомасс трофических уровней. Проанализировано влияние специализации и самолимитирования на динамику суммарных биомасс трофических уровней. Для нейронной сети, состоящей из большого числа однотипных элементов, осуществлено обоснование макроописания нейронных сетей, на основании которого предложена методика оценки параметров реальных нейронных структур.

Старший научный сотрудник сектора, канд. биолог. наук В.П. Пасеков проводит исследования в области математического моделирования биосферных процессов популяционного уровня. Актуальность этих исследований вызвана тем, что в настоящее время экологические проблемы выходят на первый план общечеловеческих интересов в связи с озабоченностью будущим для жизни на нашей планете. Проблемы устойчивого развития биосферы невозможно решить без междисциплинарных подходов. Одну из центральных ролей при этом играет анализ экологических процессов популяционного уровня, на котором протекают основные жизненные преобразования. Понять долгосрочные перспективы биосферной динамики невозможно без эволюционного подхода и прогноза эколого-генетических изменений.

Основным объектом исследований В.П. Пасекова являются биосистемы популяционного уровня, а основная цель состоит в анализе математических моделей эколого-генетической структуры популяций, статистики и динамики эколого-генетических изменений, определяющих продуктивность биоресурсов, взаимодействия видов, их распространенность, сосуществование и генетический полиморфизм.

Математическая экология и генетика в течение многих лет служат инструментами для анализа и понимания эволюционных процессов. Однако и до настоящего времени их развитие шло, главным образом, изолированно, а основные объекты изучения были чрезмерно упрощенными (в математической генетике часто это популяции со случайным скрещиванием, рассматриваемые в отношении одного локуса). Одним из направлений необходимых обобщений простых эволюционных моделей является моделирование многолокусных ситуаций, поскольку несомненно, что реакция на антропогенные воздействия, влияние отбора и важные признаки организмов находятся под контролем многих генов. Важнейшим результатом анализа простых моделей является так называемая фундаментальная теорема естественного отбора Фишера. Однако в многолокусной ситуации она верна лишь в весьма небольшом количестве специфических случаев. Получено обобщение теоремы Фишера в важной ситуации слабого отбора, распространенного в природе. Показано, что при этом уравнения динамики генетического состояния популяции являются сингулярно возмущенными. Здесь такие своеобразные характеристики популяции, как неравновесности (описывающие отклонения сочетаний генов организма от статистического равновесия со случайным комбинированием генов), эволюционируют быстро, а частоты генов являются медленными переменными. Анализ уравнений первого приближения для генных частот показывает справедливость (асимптотически) теоремы Фишера о возрастании приспособленности популяции. Более того, асимптотические уравнения динамики являются градиентами, а траектории для укрупненных (агрегированных) состояний удовлетворяют вариационным принципам.

Другим важным направлением обобщений простых моделей математической генетики является учет неслучайного скрещивания, связанного, прежде всего, с географической протяженностью области обитания. Часто эта область разделена на непересекающиеся участки (например, у человека это отдельные поселения) со свободным скрещиванием внутри них и миграционными потоками между участками. Для случая сильных миграций в такой подразделенной популяции соответствующие уравнения динамики являются сингулярно возмущенными. Доказано, что здесь медленными переменными являются агрегированные генные частоты (некоторые линейные комбинации частот в отдельных участках области обитания, определяемые структурой миграций). При агрегированном описании асимптотически выполняется фундаментальная теорема естественного отбора Фишера.

Принципы эволюционной оптимизации применимы к анализу экологических популяционных проблем без обращения к тонким генетическим механизмам в предположении существования случайной изменчивости характеристик организма (признаков), влияющих на количества производимых им потомков. Доказано, что при аппроксимации модели Лесли с дискретным временем популяции, обладающей возрастной структурой, эволюционно устойчивое (к изменению коэффициентов плодовитости и смертности) распределение демографических коэффициентов доставляет максимум количеству потомков, оставляемых особью за весь жизненный цикл. Эволюционная максимизация коэффициента плодовитости как функции признаков особи позволяет определить их устойчивые значения, не обращаясь к явному выражению для уравнений динамики. Использование данного подхода для отыскания эволюционно-устойчивых значений ряда признаков дало удовлетворительное согласие с природными наблюдениями.

Доказана применимость оптимизационных принципов к некоторым случаям эколого-генетических влияний (численности популяции и ее генетического состава) на приспособленность особей. При таком объединении экологических и генетических подходов в ситуации слабого отбора соответствующая система уравнений является сингулярно возмущенной. В модели плотно зависящих (от общей численности популяции) приспособленностей асимптотически эволюция генных частот будет градиентной с потенциалом, равным квазиравновесной численности популяции. В более общей ситуации, когда приспособленности особей зависят от некоторой скалярной характеристики состояния популяции, доказан градиентный асимптотиче-

ский характер динамики генных частот с потенциалом, равным квазиравновесному значению указанной характеристики в области непрерывности.

В прикладном плане В.П. Пасековым разработаны алгоритмы сбора генеалогических данных в численной форме, что позволяет избежать использования трудоемкого классического подхода, основанного на графическом отображении генеалогических связей в популяции. Предложен алгоритм обработки численных генеалогий с целью определения важной генетической характеристики, коэффициента инбридинга, для отдельных семей и популяции в целом.

Основное направление научной деятельности канд. физ.-матем. наук Е.И. Алексеевой связано с качественным анализом поведения структурированных динамических систем [11].

В ее работах с соавторами получен аналитический критерий влияния произвольной структуры взаимосвязи между подсистемами на устойчивость всей системы. На основе критерия получена классификация двумерных подсистем в зависимости от их реакции на структуру взаимосвязи. Для подсистем большей размерности предложен алгоритм определения влияния взаимосвязи в сети на устойчивость. Полученные результаты имеют как фундаментальное, так и прикладное значение и находят широкое применение при исследовании различных динамических систем, функционирующих на основе коллективного поведения (в том числе социально-экономических и биологических).

### **Сектор математического моделирования водных систем**

А.А. Дородницын на втором году существования ВЦ АН СССР пригласил на работу молодого 40-летнего профессора Н.Н. Моисеева, в сфере интересов которого был широкий круг фундаментальных проблем гидромеханики. К числу этих проблем относились исследование динамики тел с полостями, содержащими жидкость, колебания тяжелой идеальной жидкости в сосуде, распространение нелинейных волн на поверхности жидкости.

Для решения сложных нелинейных задач движения жидкости со свободной поверхностью было необходимо разрабатывать и использовать численные методы и алгоритмы, проводить численный эксперимент на ЭВМ, позволяющий оценить влияние различных параметров задачи на решение. Одним из примеров может служить задача о погружении с большой скоростью плоского клина в жидкость с образованием брызговых струй. Эта задача имеет практическое значение для изучения нагрузок на лыжи-поплавки гидросамолетов при посадке на воду. Трудность решения задачи связана с тем, что форма свободной поверхности брызговой струи не известна и должна определяться в результате решения задачи. Н.Н. Моисеев, П.П. Корявов и Э.П. Борисова предложили метод приближенного расчета свободной поверхности, основанный на использовании законов сохранения массы и момента количества движения жидкости [12]. Были разработаны алгоритмы решения этой задачи и проведены численные эксперименты. Для сравнения были проведены натурные наблюдения (с применением скоростной киносъемки) погружения клина в воду на полигоне МФТИ.

Автомодельность задачи погружения клина и пренебрежение силой тяжести позволили аналогичным образом рассмотреть задачу соударения струй (жидких клиньев) с образованием кумулятивной струи. П.П. Корявовым под руководством Н.Н. Моисеева были разработаны численные методы и алгоритмы решения задачи о смешении высокотемпературных ламинарных струй [13], турбулентного смешения двух однородных потоков газа [14]. П.П. Корявов и Ю.Н. Павловский провели анализ автомодельных задач смешения вязкой жидкости [15, 16] и численное решение задачи о движении кругового цилиндра в потоке вязкой жидкости [17]. Все разработанные алгоритмы были реализованы на ЭВМ и с их помощью проведены численные эксперименты. Результаты докладывались на Всесоюзных съездах по теоретической и прикладной механике (на первом — в 1960 г., втором — в 1964 г. и третьем — в 1968 г.), а также на Симпозиуме по применению быстродействующих вычислительных машин в гидродинамике в 1968 г. в городе Монтерее (Калифорния, США).

В 1966 г. Н.Н. Моисеев был избран членом-корреспондентом АН СССР. Круг его интересов значительно расширился. Н.Н. Моисеев генерировал большое число новых глубоких идей, связанных с сочетанием неформальных процедур и математических методов в проблеме управления сложными организационными, технико-экономическими, социально-экономическими и военными системами, с развитием теории иерархических систем, методов имитационного моделирования, с построением диалоговых человеко-машинных систем, с проведением имитационных

экспериментов. Развитие и реализация на практике этих идей проводилось Н.Н. Моисеевым и ближайшими его учениками и учениками его учеников более трех десятилетий.

Некоторые результаты этих исследований были доложены Н.Н. Моисеевым и Ю.Н. Павловским на Международном семинаре ЮНЕСКО по проблемам математического моделирования в Венеции в декабре 1971 г. и были с интересом восприняты специалистами из США, Англии, Франции, Италии и других стран. В результате контактов с группой профессора Дениса Медоуса, занимавшейся изучением задач глобального развития процессов, происходящих на земном шаре и возможных ограничений этого развития, П.П. Корявов и Б.Г. Сушков — сотрудники отдела Н.Н. Моисеева — были приглашены на летнюю школу в Ганновер (ФРГ), которая состоялась в 1972 г. Группой Медоуса были представлены разработанная ими технология построения имитационных моделей и описание используемого алгоритмического языка “Динамо”. По материалам этой школы в дальнейшем Р.Н. Беркович, П.П. Корявов, Ю.Н. Павловский, Б.Г. Сушков сделали формальное описание языка “Динамо” [18], которого до того не существовало, а П.П. Корявов и Б.Г. Сушков провели анализ проблем имитации динамических процессов [19].

В начале 70-х гг. у Н.Н. Моисеева появляется большой интерес к разработке методов системного анализа в проблемах рационального использования водных ресурсов [20] и перераспределения речного стока СССР [21]. По его инициативе с 1973 г. начинается активное сотрудничество ВЦ с Международным институтом прикладного системного анализа в Вене (Австрия). Этот Институт был только что создан в результате длительных переговоров между СССР и США, которые обеспечивали основное научное руководство и финансирование. В работе Института кроме советских и американских специалистов стали принимать участие также ученые из Англии, Франции, ФРГ, Польши, Венгрии, Болгарии, Канады, Японии и других стран.

Тематика работы Международного института прикладного системного анализа была весьма широкой, очень современной и включала около 10 различных проектов. Председателем Ученого Совета был академик Д.М. Гвишиани (СССР), директором — профессор Говард Райфа (Howard Raiffa) из Гарварда (США), заместителями директора были профессор Вольф Хейфеле (Wolf Haefele) из Карлсруе (ФРГ) и чл.-корр. АН СССР А.М. Летов, который одновременно руководил работой в проекте “Водные ресурсы”. Со многими сотрудниками и дирекцией Института у Н.Н. Моисеева сложились хорошие деловые отношения. С ним обсуждались ключевые вопросы развития Института, и он фактически был научным руководителем двух самых больших проектов: “Водные ресурсы” и “Методология”, — где на постоянной основе работали его сотрудники П.П. Корявов, Ю.Г. Евтушенко, И. Зимин и другие.

В течение двухлетнего периода сотрудничества было подготовлено два объемных отчета [22, 23], которые включили в себя результаты работы по моделированию речных систем Дуная, Тисы и другие вопросы методологического и прикладного характера. Интерес Н.Н. Моисеева к проблемам рационального использования водных ресурсов и сохранения уникальных водных объектов все больше переходил в необходимость проведения системных исследований для конкретных водных объектов. Начались контакты с Ростовским государственным университетом и профессором И.М. Воровичем по созданию имитационной модели динамики и качества вод в Азовском море, а также с мощными проектными институтами, такими как Гидропроект, Союзгипроводхоз и другими, которые занимались вопросами переброски речного стока северных и сибирских рек СССР в южные регионы страны, страдающие от дефицита воды необходимой для развития сельского хозяйства и промышленности. Огромные по стоимости и возможному отрицательному влиянию на окружающую природную среду и жизнь людей проекты нуждались в привлечении специалистов, способных проводить анализ функционирования сложных систем и давать оценочные прогнозы путем построения системы математических моделей происходящих процессов и проведения численных экспериментов на ЭВМ.

В ВЦ к этому времени уже накопился определенный опыт моделирования динамики водных систем и изучения проблем рационального использования водных ресурсов. Для дальнейшего развития этих работ в ВЦ было выделено дополнительное финансирование, и в феврале 1977 г. по инициативе Н.Н. Моисеева были созданы два сектора: математического моделирования водных систем, который возглавил П.П. Корявов, и рационального использования водных ресурсов, руководителем которого стал Ф.И. Ерешко.

В сектор математического моделирования водных систем пришли уже работавшие в ВЦ З.Н. Добровольская, В.Г. Киселев, Г.П. Епихов и молодые выпускники МФТИ А.Ф. Яковлев, А.И. Симонов, С.А. Иваненко, Б.В. Архипов, Д.А. Шапочкин, а затем В.В. Солбаков и выпускница МГУ Г.М. Хубларян.

Работа сектора началась с анализа нескольких конкретных проектов, которые интересовали Союзгипроводхоз и Гидропроект, построения системы математических моделей для описания гидродинамических процессов и проведения соответствующих численных экспериментов.

В 70-х гг. прошлого столетия был значительный дефицит воды в реке Волге и соответственно падал уровень Каспийского моря. Разрабатывались различные варианты спасения Каспийского моря. В частности, Союзгипроводхозом рассматривался проект переброски речного стока из Онежского озера через реку Вытегру, озеро Белое, Череповецкое и Рыбинское водохранилища в реку Волгу. Необходимо было изучить возможные изменения динамики вод Онежского озера, которые могут произойти при реализации этого проекта. Для решения этой задачи сотрудники сектора З.Н. Добровольская, П.П. Корявов, А.И. Симонов совместно с В.Ф. Баклановской и И.И. Чечель разработали двумерную нестационарную модель расчета осредненных по глубине скоростей течения и уровня воды, возникающих под воздействием ветра, стока рек и изменения объемов перераспределяемого стока. Численный расчет был проведен с использованием неявной конечно-разностной схемы методом переменных направлений [24, 25].

В Союзгипроводхозе в то же время существовал гипотетический проект отсечения Онежского залива от Белого моря плотиной, проходящей через Соловецкие острова, превращения его в пресноводный водоем и затем переброски из него воды в реку Волгу через реку Онегу (противорекой), озера Лача и Вожа. Несмотря на одиозность проекта, было принято решение построить модель динамики вод Онежского залива при различных ветрах и режиме связи с Белым морем. С.А. Иваненко и П.П. Корявовым была разработана двумерная нестационарная модель, которая позволяла рассчитывать осредненные по глубине скорости течений и уровень свободной поверхности водоема под воздействием ветра, стоковых и приливных течений. Для численного решения задачи был использован метод конечных элементов с применением криволинейных сеток, что позволило без потери точности добиться значительной экономии памяти и времени счета на ЭВМ [26–29].

В начале 80-х гг. сектор пополнился вначале студентами-дипломниками факультета прикладной математики и кибернетики МГУ, а затем сотрудниками В.В. Григорьевым и С.С. Махановым. Во многих водохозяйственных проектах возникает необходимость адекватного описания русловых течений в разветвленных речных системах, транспортных, оросительных и осушительных каналах, в устьях рек. Для этого В.В. Григорьевым, З.Н. Добровольской, Г.П. Епиховым, П.П. Корявовым под руководством Н.Н. Моисеева на основе классической системы уравнений Сен-Венана были разработаны одномерные нестационарные модели динамики русловых течений [30, 31], распространения консервативной примеси [32], управления русловым течением по сложной разветвленной сети каналов при наличии забора воды из них мощными водопотребителями [33]. З.Н. Добровольской при участии А.В. Готовцева и Ж.Н. Кудряшовой были изучены вопросы математического моделирования солености в эстуариях [34], модели гидротермодинамики двуслойно стратифицированных водоемов [35] и построена гидродинамическая модель процесса переноса взвешенных примесей в стратифицированных эстуариях [36].

Большое внимание было уделено созданию моделей взаимодействия речного стока с фильтрационными потоками подземных вод. Течение в русле реки в этом случае также описывалось системой уравнений Сен-Венана, подземный сток — уравнением Буссинеска. Г.П. Епиховым были разработаны модели взаимодействия поверхностных и подземных вод и использованы для расчета в бассейне реки Северной Двины [37]. П.П. Корявов и С.С. Маханов построили модель и провели расчеты влияния осушения болот в бассейне реки Ясельда на ее сток [38]. Для расчета фильтрационных потоков в бассейне реки Ясельда были использованы криволинейные сетки, сгущающиеся вблизи водотоков, и дивергентные разностные схемы. Д.А. Шапочкиным была разработана система обработки гидрологической информации, предназначенная для подготовки исходных данных для математических моделей основных гидрологических процессов — руслового и поверхностного стоков, напорной и безнапорной фильтрации [39].



П.П. Корявовым был проведен анализ сложных вопросов, возникающих при совместном изучении гидрологических процессов различной природы, по установлению и формализации связи между ними, исследованию возможности построения замкнутой системы математических моделей для описания этих процессов [40]. Эти вопросы особенно важны при рассмотрении гидрологических процессов, происходящих на больших территориях, включающих в себя речную сеть, озера, болота, каналы, водохранилища, осушительные, увлажнительные и другие гидротехнические системы. Для замыкания системы гидрологических моделей необходимо, например, использовать экологические модели, в частности модели роста растений, определяющие отток воды из ненасыщенной зоны почвы через корневую систему растений и транспирацию в приземный слой атмосферы. Однако в целом для решения этих вопросов требуется участие специалистов различных направлений. Поэтому продолжалось развитие научного сотрудничества сектора со многими организациями, такими как Институт водных проблем, Институт океанологии, Карельский филиал АН СССР, Вычислительный центр Ленинградского отделения АН СССР, Институт озераведения АН СССР, Гидрометцентр, ГОИН, географический факультет МГУ, Ростовский государственный университет, Институт кибернетики АН УССР, Белорусский НИИ мелиорации и водного хозяйства и другими.

В секторе под руководством В.Г. Киселева были проведены работы, имеющие большое народнохозяйственное значение, связанные с использованием водных ресурсов и организацией сельскохозяйственного производства на мелиорированных системах. В.Г. Киселевым решена нелинейная задача проверки реализуемости программы развития сельского хозяйства региона [41] (совместно с Я.Г. Гараевым), рассмотрены две задачи размещения сельскохозяйственного производства на мелиоративной системе с учетом создания межхозяйственных объединений [42] (совместно с Н.Ф. Велиевым и Ч.Г. Матвеевым), исследованы вопросы аппроксимации вероятностных ограничений в некоторых задачах планирования производства [43], рассмотрена стохастическая задача планирования сельскохозяйственного производства на мелиоративных системах [44], задача размещения сельскохозяйственного производства в объединении хозяйств мелиоративной системы [45] (совместно с А.Х. Абдуллаевым), система моделей планирования и размещения сельскохозяйственного производства на мелиоративных объектах [46]. В.Г. Киселев и А.Ф. Яковлев изучили вопросы представления картографической информации в ЭВМ и некоторые математические задачи, возникающие при реализации на ЭВМ географических информационных систем [47, 48].

В начале 90-х гг. значительно расширился круг специалистов в гидрологии, гидротехнике, экологии и других областях науки, техники, управления, которые хотели бы использовать в своих исследованиях математические модели, но не обладали нужными знаниями в области математики, численных методов, программировании. Поэтому в секторе были разработаны несколько диалоговых информационных систем, которые могли бы быть использованы этими специалистами. Так, Б.В. Архиповым была разработана диалоговая система для расчета динамики и качества воды [49], использованная для изучения распределения температуры в водоеме-охладителе Курской АЭС, С.С. Махановым — диалоговая система для расчета динамики вод в мелиоративной сети [50], использованная для сравнения работы различных проектируемых мелиоративных систем в Брестской области Белоруссии, В.В. Григорьевым, П.П. Корявовым и С.С. Махановым — информационно-диалоговая система для анализа качества окружающей среды и ее влияния на здоровье людей [51], которая использовалась для анализа ситуации в городе Серпухове.

В 1977 г. по указанию Н.Н. Моисеева в секторе началась разработка системы математических моде-



*П.П. Корявов и С.С. Маханов обсуждают результаты расчетов с использованием адаптивных сеток*

лей для описания трехмерных течений в водоемах. Вначале задача казалась совсем неподъемной из-за малой памяти и малого быстродействия использовавшихся тогда ЭВМ. Тем не менее Б.В. Архиповым были разработаны принципиальные схемы решения задачи с применением консервативных разностных схем [52] и даже проведены расчеты трехмерных бароклинных течений, возникающих в озере Иссык-Куль под воздействием сложной системы ветров [53]. Некоторые результаты расчета течений в больших озерах и морских заливах были доложены на Советско-Японском симпозиуме по вычислительной аэрогидродинамике в г. Хабаровске в сентябре 1988 г., подготовкой и организацией которого занимался ВЦ [54].

В 90-х гг. и новом тысячелетии продолжалась разработка численных методов и алгоритмов решения гидрофизических задач. Б.В. Архипов, В.В. Солбаков и Д.А. Шапочкин разработали двумерные в вертикальной плоскости модели формирования термохалинных полей в Байдарачьей губе Карского моря [55]. Б.В. Архипов, В.В. Солбаков провели расчеты полей скорости и температуры в водоеме-охладителе Калининской АЭС [56]. П.П. Корявов провел расчеты ветровых течений в стратифицированных водоемах на основе модели экмановского типа [57]. Под руководством Б.В. Архипова были проведены работы по применению математических методов и информационных технологий для моделирования гидродинамических процессов в шельфовых областях океана и оценки влияния строительства объектов нефтегазовой промышленности на окружающую среду [58–60], изучению вопросов расчетного определения характеристик морской среды (морских течений, приливных и штормовых изменений уровня моря, ледовых образований), необходимых для проектирования гидротехнических сооружений [61–63], а также разработки модели для прогноза распространения промышленных сбросов с морских буровых платформ и нефтяных разливов, в том числе с учетом наличия ледового покрова [64, 65]. На основе большого набора разработанных математических моделей были проведены численные расчеты для ряда конкретных проектов, таких как освоение нефтяных месторождений в Балтийском и Каспийском морях, на Сахалинском шельфе, сооружения прибрежных АЭС в Индии и Ираке.

С.А. Иваненко и П.П. Корявовым были рассмотрены принципы построения математической модели, описывающей динамику вод в проточном нестратифицированном водоеме, разработаны численный метод, алгоритмы расчета, проведен численный эксперимент по изучению динамики вод в Ивановском водохранилище и перемещению загрязненного объема воды, а также изменению в нем концентрации консервативного вещества [66, 67]. Большое внимание было уделено изучению современных вычислительных технологий для расчета динамики открытых потоков, выбору численных методов, построению специальных расчетных сеток, проведению численных экспериментов и анализу адекватности полученного решения результатам натуральных наблюдений. Получены эффективные решения ряда важных практических задач для иллюстрации возможностей применения вычислительных технологий [68].

В 80-е гг. сотрудники сектора и других подразделений ВЦ приняли активное участие в большом международном проекте “Динамика экосистем в пресноводных переувлажненных землях и мелководных водоемах”, который проводился под эгидой Научного совета по проблемам окружающей среды (SCOPE) и Программы ООН по окружающей среде (UNEP). Организатором и руководителем проекта был директор ВЦ академик А.А. Дородницын, который в то время был и Президентом SCOPE. В рамках работы этого проекта участники провели несколько рабочих семинаров по обсуждению различных вопросов, связанных с изучением динамики и качества вод в мелких пресноводных водоемах и болотах, развитием болотных экосистем, разнообразием видов животных и растений в переходных (от воды к суше) областях и посетили ряд заповедников в Белоруссии, Грузии, Эстонии, Индии и Таиланде. Результаты работы были подытожены в сборнике трудов [69] и книге [70].

В 1995–1997 гг. П.П. Корявов получил грант INTAS и принял участие в разработке гидрологического блока в проекте “Новая версия Московской глобальной биосферной модели”. Результаты были доложены в Потсдамском институте исследования влияния климата на конференции “Технологическое воздействие цивилизации на окружающую среду” в Карлсруе (ФРГ) в апреле 1996 г. и на рабочем семинаре в Вычислительном центре в Москве в июне 1996 г.

## Список некоторых публикаций

1. Моисеев Н.Н., Иванюков Ю.П., Столярова Е.М. Методы оптимизации. М.: Наука, 1978.
2. Иванюков Ю.П., Лотов А.В. Математические модели в экономике. М.: Наука, 1979.
3. Иванюков Ю.П., Положишников В.Б., Рассадин В.Н. Производственная народнохозяйственная функция. М.: ВЦ АН СССР, 1983.
4. Абрамов А.П., Бессонов В.А., Никифоров Л.Г., Свириденко К.С. Исследование динамики макроэкономических показателей методом производственных функций. М.: ВЦ АН СССР, 1987.
5. Вартазарова Л.С., Васильев В.И., Иванюков Ю.П., Никифоров Л.Г. Энергетика и экономика СССР 1960-1985 гг.: эконометрический анализ. М.: ВЦ АН СССР, 1988.
6. Abramov A.P. Connectedness and Necessary Conditions for an Extremum. Kluwer, 1998.
7. Абрамов А.П. Математические модели экономики дефицита. М.: ВЦ РАН, 2004.
8. Дикусар В.В., Милютин А.А. Качественные и численные методы в принципе максимума. М.: Наука, 1989.
9. Афанасьев А.П., Дикусар В.В., Милютин А.А., Чуканов С.В. Необходимое условие в принципе максимума. М.: Наука, 1990.
10. Гживачевски М., Дикусар В.В., Посацка К., Филатова Д. Методы параметрической идентификации эконометрических моделей. М.: МФТИ, 2003.
11. Алексеева Е.И., Киржнер В.М., Кузнецов В.А. Структуры и коллективное поведение. М.: Знание, 1991. Сер. "Математика и кибернетика". № 3.
12. Борисова Э.П., Корявов П.П., Моисеев Н.Н. Плоские и осесимметричные автомодельные задачи погружения клина и соударения струй // ПММ. 1959. Т. 23, №2. С. 347–360.
13. Корявов П.П. Численный расчет высокотемпературных ламинарных струй // ЖВМ и МФ. 1961. Т. 1, № 2. С. 856–868.
14. Корявов П.П. Численный расчет турбулентного смешения двух однородных потоков газа // ЖВМ и МФ. 1964. Т. 4, № 3. С. 495–511.
15. Корявов П.П., Павловский Ю.Н. Автомодельные задачи смешения вязкой жидкости // ПММ. 1968. Т. 32, № 4. С. 615–622.
16. Koryavov P.P., Pavlovsky Yu.N. Viscous Mixing of Incompressible Fluids in the Boundary-Layer Approximation // Proceedings of an International Symposium on High-Speed Computing in Fluid Dynamics. The Physics of Fluid Supplement II. 1969. Published by the American Institute of Physics, New York. P. 136–138.
17. Корявов П.П., Павловский Ю.Н. Численное решение задачи о движении кругового цилиндра в потоке вязкой жидкости // Проблемы прикладной математики и механики. М.: Наука, 1971. С. 247–261.
18. Беркович Р.Н., Корявов П.П., Павловский Ю.Н., Сушков Б.Г. Динамо — язык математического моделирования (формальное описание). М.: ВЦ АН СССР, 1971. 30 с.
19. Корявов П.П., Сушков Б.Г. Имитация динамических процессов М.: Знание, 1973. Сер. "Математика и кибернетика". 60 с.
20. Агасандян Г.А., Вольфсон И.Е., Добровольская З.Н., Киселев В.Г., Корявов П.П., Моисеев Н.Н., Усачев Е.С., Шмидт А.Г. Методы системного анализа в проблемах рационального использования водных ресурсов // Тр. междунар. конф. "Моделирование экономических процессов" (Ереван, апрель 1974 г.). М.: ВЦ АН СССР, 1975. С. 16–34.
21. Дунин-Барковский Л.В., Моисеев Н.Н. Система моделей перераспределения речного стока СССР // Водные ресурсы. 1976. № 3. С. 13–20.
22. Методы системного анализа в проблемах рационального использования водных ресурсов. Т.1. Лаксембург: Изд-во ВЦ АН СССР и МИПСА, 1974.
23. Методы системного анализа в проблемах рационального использования водных ресурсов 1976. Т.2. Лаксембург: Изд-во ВЦ АН СССР и МИПСА, 502 с.
24. Баклановская В.Ф., Добровольская З.Н., Корявов П.П., Чечель И.И. Численный расчет плоских течений в Онежском озере при переброске вод // Водные ресурсы. 1980. № 3. С. 113–121.
25. Добровольская З.Н., Корявов П.П., Симонов А.И. Расчет течений в Онежском озере с учетом антропогенного воздействия // Водные ресурсы. 1981. № 3. С. 100–104.
26. Иваненко С.А., Корявов П.П. Использование метода конечных элементов для моделирования движения воды в водоеме сложной формы. М.: ВЦ АН СССР, 1983. 38 с.
27. Иваненко С.А. Численное моделирование течений в мелких водоемах на криволинейных сетках // Математическое моделирование динамики вод в речных бассейнах, больших озерах и морских заливах. М.: ВЦ АН СССР, 1988. С. 91–109.

28. *Koryavov P.P.* Simulation of Dynamics and Quality of Water in Bays, Large Lakes, and Reservoirs // *Modern Problems in Computational Aerohydrodynamics*. Moscow: Mir Publishers, 1992. P. 251–270.
29. *Ivanenko S.A.* Construction of Curvilinear Grids for Computing Flows in Basins // *Modern Problems in Computational Aerohydrodynamics*. Moscow: Mir Publishers, 1992. P. 211–250.
30. *Добровольская З.Н., Епихов Г.П., Корявов П.П., Моисеев Н.Н.* Математические модели для расчета динамики и качества сложных водных систем // *Водные ресурсы*. 1981. № 3. С. 33–51.
31. *Епихов Г.П.* Об одной математической модели речного бассейна // *Водные ресурсы*. 1978. № 5.
32. *Кудряшова Ж.Н.* Численный метод решения задачи о распространении консервативной примеси в водотоке // *ЖВМ и МФ*. 1978. Т. 18, №6.
33. *Корявов П.П., Григорьев В.В.* Управление гидрологией речного бассейна. М.: ВЦ АН СССР, 1988. С. 5–16.
34. *Добровольская З.Н., Кудряшова Ж.Н., Готовцев А.В.* Математическое моделирование солёности в эстуариях // *Водные ресурсы*. 1986. № 1. С. 95–101.
35. *Добровольская З.Н.* Модели гидротермодинамики двуслойно стратифицированных водоемов // М.: ВЦ АН СССР, 1987.
36. *Добровольская З.Н.* Гидродинамическая модель процесса переноса взвешенных примесей в стратифицированных эстуариях // *Математическое моделирование динамики вод в речных бассейнах, больших озерах и морских заливах*. М.: ВЦ АН СССР, 1988. С. 110–133.
37. *Епихов Г.П.* Математическая модель плановой фильтрации во взаимодействии с речным стоком и ее реализация // *Водные ресурсы*. 1980. №2.
38. *Корявов П.П., Маханов С.С.* Моделирование подземного стока при наличии антропогенных воздействий // *Математическое моделирование динамики вод в речных бассейнах, больших озерах и морских заливах*. М.: ВЦ АН СССР, 1988. С. 17–39.
39. *Шапочкин Д.А.* База данных для системы обработки гидрологической информации // *Математическое моделирование динамики вод в речных бассейнах, больших озерах и морских заливах*. М.: ВЦ АН СССР, 1988. С. 56–63.
40. *Корявов П.П.* Проблемы замыкания системы гидрологических моделей речного бассейна // *Математическое моделирование. Процессы в сложных экономических и экологических системах*. М.: Наука, 1986. С. 220–240.
41. *Гараев Я.Г., Киселев В.Г.* Нелинейная задача проверки реализуемости программы развития сельского хозяйства региона. М.: ВЦ АН СССР, 1978. 20 с.
42. *Велиев Н.Ф., Киселев В.Г., Матвеев Ч.Г.* Две задачи размещения сельскохозяйственного производства на мелиоративной системе с учетом создания межхозяйственных объединений. М.: ВЦ АН СССР, 1982. 50 с.
43. *Киселев В.Г.* Аппроксимация вероятностных ограничений в некоторых задачах планирования производства // *ЖВМ и МФ*. 1983. №1. С. 83–94.
44. *Киселев В.Г.* Стохастическая задача планирования сельскохозяйственного производства на мелиоративных системах. М.: ВЦ АН СССР, 1984. 55 с.
45. *Абдуллаев А.Х., Киселев В.Г.* Задача размещения сельскохозяйственного производства в объединении хозяйств мелиоративной системы. М.: ВЦ АН СССР, 1985. 25 с.
46. *Киселев В.Г.* Система моделей планирования и размещения сельскохозяйственного производства на мелиоративных объектах // *Кибернетика и вычислительная техника*. М.: Наука, 1987. С. 8–18.
47. *Киселев В.Г., Яковлев А.Ф.* О представлении картографической информации в ЭВМ // М.: ВЦ АН СССР, 1979. 27 с.
48. *Киселев В.Г., Яковлев А.Ф.* О некоторых математических задачах, возникающих при реализации на ЭВМ географических информационных систем // *Кибернетика и вычислительная техника*. 1987. № 3. С. 277–286.
49. *Архипов Б.В.* Диалоговая система для расчета динамики и качества воды. М.: ВЦ АН СССР, 1991. 14 с.
50. *Маханов С.С.* Диалоговая система для расчета динамики воды в мелиоративной сети. М.: ВЦ АН СССР, 1993. 25 с.
51. *Prokopenko Yu. I., Koryavov P.P., Ilchenko I., Grigoriev V.V., Makhanov C.C., Ilin V.* Information dialogue system for analysis and estimation of the environment hazard for human health in town // *Proceedings of the International Conference on Information Technology and People, Part II, Moscow, 1993*. P. 171–175.
52. *Архипов Б.В.* Исследование и применение консервативных разностных схем для трехмерных уравнений бароклинных течений. М.: ВЦ АН СССР, 1983.

53. *Архипов Б.В.* Некоторые трехмерные модели бароклинных течений в больших озерах // Математическое моделирование динамики вод в речных бассейнах, больших озерах и морских заливах. М.: ВЦ АН СССР, 1988. С. 64–90.
54. *Koryavov P.P., Ivanenko S.A., Arhipov B.V.* On some approaches to calculation of the flows in lakes and bays // Тр. Советско-Японского симпозиума по вычислительной аэрогидродинамике. Т.1. М.: ВЦ АН СССР, 1989. С. 117–127.
55. *Архипов Б.В., Солбаков В.В., Шапочкин Д.А.* Моделирование вертикальной структуры термохалинных полей в Байдаракской губе // Океанология. 1993. Т. 33, № 5. С. 641–648.
56. *Архипов Б.В., Солбаков В.В.* Расчет термогидродинамического режима водоема по двухмерной модели // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1994. Т. 30, № 5. С. 671–685.
57. *Корявов П.П.* Расчет ветровых течений в стратифицированном водоеме на основе модели экмановского типа // Водные ресурсы. 1997. № 4. С. 404–408.
58. *Архипов Б.В., Котеров В.Н., Кочерова А.С., Солбаков В.В., Хубларян Г.М.* Моделирование обтекания гидротехнических сооружений в шельфовой зоне моря // Водные ресурсы. 2003. Т. 30, № 6. С. 711–717.
59. *Архипов Б.В., Котеров В.Н., Кочерова А.С., Солбаков В.В., Хубларян Г.М.* Расчет распространения взвешенных веществ в прибрежной области моря // Водные ресурсы. 2004. Т. 31, № 1. С. 1–9.
60. *Архипов Б.В., Котеров В.Н., Солбаков В.В.* Трехмерное моделирование обтекания гидротехнических сооружений на океаническом шельфе // М.: ВЦ РАН, 2004. 48 с.
61. *Архипов Б.В., Попов С.К.* Моделирование плотностных и ветровых течений в юго-восточной части Баренцева моря // Океанология. 1996. Т. 36, № 6. С. 805–813.
62. *Архипов Б.В., Киселев В.Г., Солбаков В.В.* Двумерная модель термического режима водоема сложной формы // Тр. ИОФАН. Вычислительная гидродинамика природных течений. 1997. Т. 53. С. 89–100.
63. *Архипов Б.В., Киселев В.Г., Солбаков В.В., Марченко А.В.* Моделирование термохалинного и ледового режима морского залива // Тр. ИОФАН. Вычислительная гидродинамика природных течений. 1997. Т. 53. С. 100–109.
64. *Архипов Б.В., Котеров В.Н., Солбаков В.В.* Модель АКС для прогноза распространения промышленных сбросов с морских буровых платформ // М.: ВЦ РАН, 2000. 71 с.
65. *Архипов Б.В., Пархоменко В.П., Солбаков В.В., Шапочкин Д.А.* Математическое моделирование распространения нефтяных разливов в морской среде // М.: ВЦ РАН, 2001. 54 с.
66. *Доценко Ю.С., Иваненко С.А., Корявов П.П., Эдельштейн К.К.* Математическая модель динамики вод и распространения загрязняющих веществ в Ивановском водохранилище // Водные ресурсы. 2000. Т. 27, № 4. С. 292–304.
67. *Иваненко С.А., Корявов П.П.* Динамика вод и распространения загрязняющих веществ в водохранилище // Математическое моделирование. 2002. Т. 14, № 6. С. 105–118.
68. *Иваненко С.А., Корявов П.П., Милитеев А.Н.* Современные вычислительные технологии для расчета динамики открытых потоков // Водные ресурсы. 2002. Т. 29, № 5. С. 564–577.
69. *Ecosystem Dynamics in Freshwater Wetlands and Shallow Water Bodies. Proceedings of the international scientific workshop. M.: Centre of International Projects GKNT, 1982. Vol. 1. P. 312; Vol. 2. P. 424.*
70. *Wetlands and Shallow Continental Water Bodies. Vol. 1: Natural and human Relationships / Ed. by B.C. Patten, S.E. Jorgensen, H. Dumont, B. Gopal, P.P. Koryavov, J. Kvet, H. Löffler, Yu.M. Svirezhev, J.G. Tundisi. The Hague: SPB Academic Publishing, 1990. P. 759.*

## **ОТДЕЛ МЕТОДОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ РАЗВИВАЮЩИХСЯ СИСТЕМ**

*В.Р. Хачатуров, Г.С. Булгакова, В.Е. Веселовский, А.В. Злотов, И.А. Крылов*

---

Отдел методов проектирования развивающихся систем был образован решением Ученого совета ВЦ РАН 14 февраля 1985 г. (на базе сектора с тем же названием, образованного 1 декабря 1974 г.). Отдел состоял из пяти секторов. Заведующим отделом и одновременно заведующим одного из секторов был утвержден В.Р. Хачатуров, заведующие секторами — Н.Д. Астахов, В.Е. Веселовский, А.В. Злотов, И.А. Крылов.

В.Р. Хачатуров окончил аспирантуру ВЦ АН СССР под руководством д.ф.-м.н. В.П. Черенина в 1964 г. После окончания аспирантуры работал в Институте математики и механики Академии наук Казахской ССР, где создал и возглавил лабораторию экономико-математических методов. В 1970 г. В.Р. Хачатуров вернулся в ВЦ АН СССР на должность старшего научного сотрудника, кандидата наук в лабораторию теории управления, которую в то время возглавлял Н.Н. Моисеев. Здесь он организовал и возглавил группу научных сотрудников, которая переросла в сектор, а затем в отдел. В эту группу вошли несколько сотрудников из лаборатории Н.Н. Моисеева и выпускники Московского физико-технического института, которые со временем возглавили три из пяти секторов отдела.

Основные направления работы отдела были следующие:

- разработка математических моделей, методов и алгоритмов для решения задач дискретной оптимизации;
- разработка математических основ проектирования комплексного освоения природных ресурсов произвольного региона;
- разработка математического обеспечения конкретных человеко-машинных систем для автоматизированного проектирования освоения нефтегазодобывающих регионов и отдельных месторождений и их широкое внедрение.

Еще во время работы в Казахстане В.Р. Хачатурова заинтересовала возможность применения математических методов и вычислительной техники для решения народно-хозяйственных задач, связанных с освоением природных ресурсов новых и слабо развитых территорий. Эта тематика до сих пор актуальна для нашей страны и для многих развивающихся стран. В то время объектами территориального развития в нашей стране была Западная Сибирь и Казахстан, где и началось масштабное освоение нефтегазодобывающих регионов. Министерство нефтяной и газовой промышленности проявило большую заинтересованность в предложенных В.Р. Хачатуровым методах математического моделирования автоматизации проектирования освоения новых территорий и отдельных месторождений и поддержало его инициативу. При поддержке дирекции ВЦ АН СССР работа отдела на долгие годы была связана с заказами Министерства нефтяной, а затем Министерства газовой промышленности, которые оказывали отделу большую финансовую помощь. Благодаря этой поддержке численность сотрудников отдела быстро росла и вскоре это был самый крупный отдел в институте (более 60 человек). Впоследствии стало понятно, что в Министерстве удалось выйти на уважаемых людей в отрасли, таких как В.Ю. Филановский, С.А. Оруджев, Ш.П. Донгарян, П.Д. Алексеев, Б.А. Николаев. Эти люди в течение многих лет помогали нам разбираться в вопросах технологии и возникающих проблемах при проектировании, а также в проблемах, возникающих в проектных институтах. Не всегда в этих учреждениях встречали с энтузиазмом перспективу перейти на новые методы работы или хотя бы оторваться от текучки. В то время АСУ только зарождались, о САПР особого представления еще не было.

Отдел должен был создать для проектных институтов отрасли системы автоматизированного проектирования основных технологических систем, применяемых для добычи нефти и газа, используя современные математические методы и ЭВМ. Начиная работу с Министерством, отдел одновременно создавал универсальную систему, пригодную для проектирования освоения

широкого круга объектов, а не только нефтяных или газовых месторождений. Нефтяное месторождение оказалось идеальным объектом для моделирования. Действительно, здесь на одном участке территории располагаются несколько технологических систем, которые можно считать отраслями. Основные из них: система сбора и транспорта нефти и попутного газа, система поддержания пластового давления, система электроснабжения, система автомобильных дорог. На этой территории нужно разместить нефте- и газопроводы, водоводы, насосные станции, пункты подготовки нефти, электростанции и линии электропередач, связать все системой автомобильных дорог. А территория такая, какая есть: где болота, озера и реки, где заповедники и сельхозугодия, а где — вечная мерзлота... Итак, речь шла о размещении на территории технологических объектов и связывающих их коммуникаций. В образованную для работы с Министерством группу вошли сотрудники ВЦ В.Р. Хачатуров, В.П. Черенин, Г.С. Булгакова, И.А. Крылов, С.И. Петрова, И.Х. Сигал, Л.Н. Тарасенко, а также выпускники Московского физико-технического института Н.Д. Астахов, В.Е. Веселовский, А.В. Злотов и А.В. Федосеев. Для того чтобы понять, какие проблемы возникают при проектировании, почти вся группа отправилась на целый месяц в командировку в Тюмень в ведущий институт Гипротюменнефтегаз и в Тюменский главк Министерства. Здесь мы получили поддержку и навсегда сохранили лучшие воспоминания о таких людях, как В.И. Муравленко, Б.Е. Щербина, В.П. Курамин, Ф.Г. Аржанов, В.К. Борисенко, И.Ш. Алеев, Е.И. Голдырев, Н.К. Праведников, В.А. Панов, Ю.П. Баталин, В.П. Патер, В.А. Гофлин. В институте и главке мы посетили все отделы, прослушали лекции и получили хорошее представление о том, как создают проекты традиционным способом.

Какие принципиальные научные проблемы необходимо разрешить для получения наилучшего проекта, который может быть реализован на практике?

Основные проблемы, с которыми пришлось столкнуться при разработке методов решения этих задач, были следующие:

- многоэкстремальность;
- взаимовлияние различных факторов, имеющее нелинейный характер;
- многокритериальность;
- динамика;
- неопределенность исходной информации;
- неформализуемость полного описания процесса освоения;
- необходимость динамического проектирования (или скользящего планирования).

Заметим, что всякий раз, когда экономисты-географы пытались перейти от локационного анализа к региональному, они неизбежно сталкивались с перечисленными нерешенными проблемами.

Трудности решения практически каждой из этих проблем усугублялись тем, что к тому времени не было математического аппарата для получения методов их решения. Необходимо было параллельно разрабатывать и математический аппарат, и методы, и алгоритмы.

За эти годы был разработан достаточно мощный арсенал методов оптимизации и оптимального управления, с помощью которых оказалось возможным решение различных новых классов оптимизационных задач. Однако ввиду перечисленных особенностей для решения задач проектирования схем комплексного освоения территории применения лишь одних методов оптимизации оказалось недостаточным.

Необходимы были новые подходы и методы, позволяющие обоснованно сочетать математические методы с опытом человека, принимающего решение, в дальнейшем именуемого *проектировщиком*. Такой метод был создан и назван *аппроксимационно-комбинаторным методом декомпозиции и композиции систем*. Этот метод позволил математически обоснованно осуществлять декомпозицию сложной задачи проектирования схем комплексного освоения территорий на совокупность более простых частных задач с последующим синтезом комплексного проекта на основе специальным образом выделенных множеств проектов частных задач. Реализация этого метода осуществляется с помощью диалоговых систем проектирования схем комплексного освоения территорий.

В 1973 г. была создана Система проектирования генеральных схем обустройства нефтяных месторождений, с помощью которой были получены проекты комплексного обустройства Самотлорского месторождения, самого крупного в стране и в мире.

За это время Тюмень стала для нас родным домом. Трудно сосчитать, сколько раз мы прилетали туда с промежуточными результатами для обсуждения результатов и выявления ошибок. Большую помощь всегда оказывали нам Начальник Главтюменнефтегаза В.И. Муравленко, начальник технического отдела главка В.К. Борисенко и главный инженер предприятия (ГИП) Самотлора И.Ш. Алеев. После этого мы поехали на Самотлор с нашими результатами. Обсуждение происходило на научно-техническом совете Объединения “Нижневартовскнефтегаз”, уже не с проектировщиками, а со строителями и нефтедобытчиками. Здесь, как и в Тюмени, работа была одобрена. На Самотлоре мы познакомились с замечательными людьми, которые очень помогли нам и навсегда остались нашими друзьями. Это, прежде всего, легенда Самотлора, глава объединения Р.И. Кузоваткин, главные инженеры Н.П. Дунаев, Ф.Н. Маричев.

После отладки системы на Самотлоре мы проектировали генеральные схемы обустройства на многих месторождениях Западной Сибири и, в конце концов, система была переложена на ЭВМ серии ЕС, которой был оснащен институт Гипротюменнефтегаз, и через некоторое время все месторождения Западной Сибири проектировались с использованием этой системы. Кстати, это оказалось возможным благодаря тому, что в Московском физико-техническом институте был организован факультет переподготовки инженеров и на него мы ежегодно набирали группу нефтяников, которым преподавали математические методы, организацию САПР, устройство и идеи, заложенные в системе. Перекладка системы на ЭВМ серии ЕС была осуществлена под нашим руководством и совместно с группой сотрудников института Гипротюменнефтегаз, руководитель которой Э.А. Ахпателов прошел двухгодичную подготовку на факультете переподготовки инженеров в МФТИ и научную подготовку в ВЦ РАН на базе работ сотрудников нашего отдела.

В дальнейшем были совместные работы с институтом “ПечорНИПИНефть” по проектированию обустройства Усинского и Возейского месторождений КомиАССР, месторождений Каламкас и Каражамбас в Казахстане вместе с проектным институтом “КазНИПИнефть” в Гурьеве (ГИП Г.Н. Лобиков).

Следующим объектом, в проектировании которого мы приняли участие, было знаменитое гигантское газовое месторождение Уренгой. Размещение установок комплексной подготовки газа (УКПГ) и структуры коммуникаций были запроектированы с помощью системы в сотрудничестве с ГИП Уренгойского месторождения П.Ф. Буракевичем и директором института ВНИПИгаздобыча А.В. Буераковым.

Использование системы для проектирования обустройства нефтяных и газовых месторождений страны помогло сэкономить сотни миллионов рублей. Практика показала, что при сравнении традиционных проектов с проектами системы для сложных объектов экономия расходов могла достигать 20%.

Мы регулярно получали премии за создание и внедрение новой техники.

Заметим, что работа выдвигалась на соискание Государственной премии СССР и дошла до финала, что говорит о ее высокой оценке.

Теперь следует еще раз отметить, что в созданную систему проектирования все физические объекты входят через свои стоимостные показатели, т.е. через зависимость их стоимости от мощности и категории территории, на которой они находятся. А это, вообще говоря, означает, что для системы все равно, какие объекты и какие коммуникации следует размещать.

За время существования отдела мы приняли участие в проектировании освоения многих месторождений страны. Месторождения Западной Сибири, Республики Коми, Казахстана, группа месторождений Черного и Азовского морей, 22 газовых месторождения Якутии, месторождения на шельфе о. Сахалин (главный инженер института СахалинНИПИнефтегаз Е.Г. Аршев). Мы участвовали в обосновании выбора трассы магистрального газопровода с Ямальских газовых месторождений через водораздел и Байдарацкую губу в Европу и в проектах размещения буровых платформ на шельфовых месторождениях Дракон и Белый Тигр в Южно-Китайском море в территориальных водах Вьетнама. Там удалось существенно сократить количество чрезвычайно дорогостоящих платформ.



В отделе обучались, стажировались и подготавливали диссертации специалисты из разных регионов страны, а также из Казахстана, Армении, Таджикистана, Киргизии, Азербайджана, Монголии, Кубы и Вьетнама. С Кубой и Вьетнамом получилось хорошее многолетнее сотрудничество. Нами были предложены варианты размещения пунктов сбора и зонирования плантаций грейпфрутов в провинции Матансас и на острове Хувентуд для Кубы (это прототип “острова сокровищ” Стивенсона); варианты освоения плато Тэнь-Нгуен во Вьетнаме; варианты размещения складов продовольствия и оценки стратегий его завоза через различные порты в восьми засушливых странах юга Африки с целью снабжения распределенного по территории потребителя; также имитационная система оценки вариантов строительства и рациональной стоимости миниэлеваторов с учетом конъюнктуры рынка в условиях перехода к малым формам производства в период перестройки для одного из районов Ставрополя.

Сотрудниками отдела защищены 3 докторские и 14 кандидатских диссертаций, опубликовано свыше 200 печатных работ, 19 кандидатов наук подготовлено для стран ближнего Зарубежья, Вьетнама и Кубы.

Разработанное в отделе математическое обеспечение (модели, алгоритмы и программы) предназначено для решения следующих задач:

- представление и обработка информации о неоднородной территории;
- оптимальное размещение объектов на неоднородной территории, когда производственные характеристики заданы в статике или в динамике;
- оптимальное размещение пунктов обслуживания большого числа потребителей, расположенных на неоднородной территории;
- оптимальное размещение пунктов сбора сырья и его переработки на всех этапах — от источника сырья до пунктов потребления готовой продукции (многоэтапная задача размещения);
- построение оптимальной структуры разнообразных сетей: трубопроводов, дорог, водоводов, электросетей и др.;
- оптимизация параметров сети заданной структуры (типа компрессорных и насосных станций, диаметры труб, сечение проводов, ширина полотна дороги и т. п.);
- оптимальное трассирование различных коммуникаций с учетом неоднородности территории;
- оптимальное размещение производственных объектов с коммуникациями;
- оптимальное размещение объектов различного назначения с учетом эффекта агломерации;
- построение оптимальной структуры разнородных коммуникационных сетей с учетом эффекта от агломерации коммуникаций на ребрах;
- оптимизация планов добычи и переработки полезных ископаемых для группы месторождений по различным критериям: максимизация прибыли и накопленной добычи за плановый период; скорейший выход на заданный уровень добычи; максимизация времени нахождения на максимальном уровне добычи;
- оптимизация очередности освоения месторождений с учетом коммуникационных сетей, связывающих их с перерабатывающими предприятиями;
- оптимальное управление добычей (задачи выбора наилучшего варианта плана добычи);
- многокритериальный анализ вариантов планов добычи полезных ископаемых и проектов регионального обустройства.

На основе этого универсального математического обеспечения можно создавать системы формирования проектов планов развития различных отраслей и комплексного освоения территорий.

В 1989 г. вышла в свет монография В.Р. Хачатурова “Математические методы регионального программирования (М.: Наука, 1989. 302 с.). В отзыве об этой книге (с. 300) академик А.А. Дородницын писал: “...в этой книге даются математические основы регионального программирования — области региональной экономики, которая занимается теорией и количественными методами решения задач разработки проектов комплексного развития территорий...”.

Были выполнены следующие научные и практические разработки:

- разработаны многочисленные модели задач дискретной оптимизации и соответствующие методы и алгоритмы, опубликованы сотни статей и брошюр. Итоговой крупной научной работой является книга коллектива сотрудников отдела “Комбинаторные методы и алгоритмы решения

задач дискретной оптимизации большой размерности” (М.: Наука, 2000, 362 с.). По этой теме защищены десятки кандидатских диссертаций и 4 докторских диссертации;

— разработаны математические основы регионального программирования (итоговой крупной работой является книга В.Р. Хачатурова “Математические методы регионального программирования”).

— разработаны ряд крупных автоматизированных систем проектирования: “Система проектирования генеральных схем обустройства нефтяных и газовых месторождений на ЭВМ”, “Система проектирования морских месторождений нефти и газа”, “Системы перспективного планирования добычи нефти и газа для отдельного месторождения и группы месторождений региона” и ряд других. Эти системы были широко внедрены при проектировании крупнейших месторождений и регионов в нашей стране и за рубежом: Самотлорское, Федоровское, Тепловское, Савуйское, Южно-Балыкское, Повховское, Холмогорское (Западная Сибирь), Возейское, Усинское (Коми АССР), Медведовское (Куйбышевская обл.), Каламкас, Каражанбас (Казахстан), морские месторождения острова Сахалина, Вьетнама и другие, а также при планировании добычи нефти и газа группы месторождений Западной и Восточной Сибири.

Перечислим разработанные сотрудниками отдела некоторые Системы, связанные с обустройством нефтегазовых месторождений и развитием регионов:

— проектирование схем обустройства нефтяных и газовых месторождений на суше и на море;

— система формирования показателей добычи нефти;

— планирование развития газодобывающих районов и предприятий. (В 2003 г. разработчики систем планирования добычи газа и нефти В.Р. Хачатуров, А.Н. Соломатин и В.Н. Бобылев вместе с Н.К. Байбаковым (бывшим председателем Госплана СССР), Р.Д. Маргуловым (бывшим первым заместителем министра Газпрома СССР, ныне председателем Международной топливно-энергетической ассоциации) и академиком А.Н. Дмитриевским (директором института Проблем нефти и газа РАН) были удостоены Премии и медали им. А.А. Косыгина Российского союза товаропроизводителей “За большие достижения в решении проблем развития экономики России” (за работу “Системный подход в прогнозировании и организации поиска, разведки и добычи газа и нефти”). Результаты всех этих работ были обобщены в монографии Р.Д. Маргулова, В.Р. Хачатурова, А.В. Федосеева “Системный анализ в перспективном планировании добычи газа”. М.: Недра, 1992. 287 с. Неоценимую роль в постановке задач перспективного планирования и в анализе результатов расчетов сыграли руководители подразделений Мингазпрома СССР и ОАО “Газпром”: Г.Д. Маргулов, Е.К. Селихова, Г.И. Тарасова, А.И. Омельченко, А.Д. Седых, Г.П. Писчасов, В.Г. Подюк, Н.И. Кабанов.);

— экология и промышленная безопасность;

— среда программирования Р/6 и разработка прикладных программных систем;

— математическое моделирование взаимодействия финансового и промышленного капиталов в интегрированных корпоративных структурах;

— система размещения объектов и коммуникаций;

— система построения и анализа сетей;

— система планирования производства, хранения, транспортировки и распределения нефтепродуктов;

— система анализа аварийных ситуаций;

— система оценки экологического состояния территории и выбора природоохранных мероприятий.

Накопленный опыт системного подхода к решению сложных задач позволил успешно справляться со многими другими сложными проблемами. Например, был выполнен комплекс работ по теме: “Прогнозирование свойств новых материалов”. По этой теме были выпущены два сборника работ и защищена одна кандидатская диссертация.

В заключение отметим, что 35 лет существования нашего коллектива прошли в спокойной обстановке без конфликтов. Этому, конечно, способствовала общая атмосфера в нашем институте.

С глубоким прискорбием вспоминаем безвременно ушедших из жизни в расцвете сил наших сотрудников: Н.Д. Астахова, М.А. Ведюшкина, Ю.Н. Жидкова, В.Л. Сметанина, А.П. Тер-Саакова, А.В. Федосеева, В.П. Черенина.

## ОТДЕЛ ИССЛЕДОВАНИЯ ОПЕРАЦИЙ

*Ю.Е. Малащенко*

---

1. В 1966 г. в Вычислительном центре АН СССР в составе отдела, возглавляемого Н.Н. Моисеевым, открывается новый сектор теории операций (оперативных работ), именно так было записано в приказе, что отражало попытку найти русское название бурно развивающейся новой прикладной научной дисциплины: Operations Research. Историки науки считают, что новое направление научных исследований и сам термин Operations Research зародились в Англии. Именно там в период с 1935 г. по 1938 г. были начаты и интенсивно проводились серии экспериментов, направленных на разработку многокомпонентной системы противовоздушной обороны.

Существует множество определений той области современной науки, которая называется исследованием операций. Согласно Советскому энциклопедическому словарю (М., 1979) “исследование операций — прикладное направление кибернетики, используемое для решения организационных (в том числе экономических) задач (распределение ресурсов, управление запасами, упорядочивание и согласование и др.). . .”.

Совокупность математических моделей исследования операций можно разбить на три группы.

К первой группе относятся детерминированные модели, которые были разработаны после второй мировой войны: линейное программирование, целочисленное программирование, теория графов, потоки в сетях, геометрическое программирование, нелинейное программирование, программирование для случая задач большой размерности, теория оптимального управления.

Ко второй группе относятся модели с неопределенностью, в том числе стохастические модели: случайные процессы, теория массового обслуживания, теория полезности, анализ управляющих решений, теория игр, теория поиска, имитационное моделирование и динамическое программирование.

Третью группу составляют наиболее важные модели конкретных процессов, являющихся общими для многих областей применения методов исследования операций: прогнозирования, учета, финансовой деятельности и управления экономикой, сбыта и рекламы, управления трудовыми ресурсами, экономического анализа инвестиций, иерархических систем управления; вычислительных и информационных систем, автоматизированных систем разработки проектов, управления запасами, составления календарных планов производства и графика работ, замены, ремонта и анализа надежности оборудования, размещения и загрузки производственных мощностей, планирования производства и т.п.

2. Ярким представителем нового научного направления был Ю.Б. Гермейер, которого 3 марта 1966 г. Ученый Совет ВЦ АН СССР утвердил в должности заведующего новым сектором. Он окончил мехмат МГУ в 1941 г. и был направлен на предприятия авиационной (читай оборонной) промышленности, где проработал до 1966 г. Ю.Б. Гермейер входил в группу главного конструктора И.В. Дилона и занимался проблемами эффективности авиационных торпед. В период с 1941 г. по 1966 г. он проводил фундаментальные научные исследования по разработке универсального метода оценки эффективности воздушной стрельбы. Предложил новые методы оценки схем вооружения боевых самолетов. Руководил большим коллективом ученых и возглавлял работы в области эффективности и надежности систем авиационной техники. Принимал непосредственное участие в создании новой техники и исследовании по выбору их характеристик.

Созданная им в те годы методика оценки эффективности широко используется в исследовательских и проектных организациях. Разработанные методы имеют широкую область применения, наглядны и достаточно удобны для практического использования.

Логика научных исследований и необходимость решения практических задач привели к переходу от вероятностных постановок задач к максиминным и от частных задач по выбору характеристик технических изделий к общим задачам исследования операций теории игр и теории надежности. Он указывает, что обычное для практики исследований по надежности систем использование экспоненциального закона для распределения времени безотказной работы элементов системы во многих случаях необоснованно и может привести к значительным ошибкам. С другой стороны, как правило, практически невозможно получить экспериментально достаточно точное представление об истинном законе распределения. Ю.Б. Гермейер предложил возмещать недостаток сведений о законах распределения использованием принципа гарантированного результата. Он получает и первые результаты по наилучшим законам распределения, по-новому осветившие роль стандартных законов теории надежности.

Ю.Б. Гермейер, высоко квалифицированный специалист, защитил в 1947 г. кандидатскую, а в 1963 г. докторскую диссертацию. В 1966 г. Ю.Б. Гермейер организует научный семинар “Теория игр”, который уже через два года расширяет свою тематику и начинает функционировать как семинар по исследованию операций. В 1967–1968 гг. в отделе Н.Н. Моисеева был проведен уникальный вычислительный эксперимент: на машине БЭСМ имитировалась война трех стран, ход которой подробно описан в работе Ю.Н. Павловского “Имитационные системы и модели” (М., 1990).

В 1966 г. на мехмате МГУ Ю.Б. Гермейер начинает читать курс “Математические и методологические основы исследования операций”. А в 1970 г. на базе отделения прикладной математики мехмата создается новый факультет МГУ — факультет вычислительной математики и кибернетики. Здесь профессор Ю.Б. Гермейер создает кафедру исследования операций.

В этот период в сферу его научных интересов входит формирование общей методологии исследования операций, разработка методов решения оптимизационных задач и конкретные задачи теории надежности. Им дано новое простое и общее доказательство сходимости метода штрафных функций. Предложено и обосновано сведение задачи нахождения максимина непрерывной функции, заданной на замкнутых ограниченных множествах евклидова пространства, к задаче математического программирования. Предложенный прием является значительным обобщением классического сведения решения матричных игр к линейному программированию. Обоснован и доведен до программы на языке Алгол-60 новый метод отыскания максиминов, названный методом невязок. Установлен новый вид необходимых условий максимина. С помощью решений уравнений, соответствующих полученным необходимым условиям, предложено решение непрерывных игр сводить к решению матричных игр. Рассмотрена задача о максимине с ограничениями. Найден общий прием освобождения от ограничений с помощью множителей Лагранжа. На его основе выводятся необходимые условия для максимина с ограничениями. Полученные условия, а также метод штрафных функций обобщаются на случай наличия ограничений как у максимизирующей, так и у минимизирующей стороны. Сформулирован и обоснован дискретный принцип максимума для таких задач.

Проанализированы методы свертывания многих критериев в один, и установлена полнота элементарных способов свертывания. Даны практические рекомендации по свертыванию. Установлен принцип уравнивания для ряда максиминных задач распределения ресурсов.

Ю.Б. Гермейером была поставлена и решена задача о выборе момента переключения элементов для повышения надежности. При этом установлена эффективность смешанных стратегий переключения. Решена задача о наиболее выгодном методе линейной фильтрации сигналов неопределенного вида с аддитивными помехами. Этот результат представляется гораздо более близким к практике, чем классические результаты Колмогорова–Винера и Заде–Раггозини. Предложенные методы и решения имеют большое теоретическое значение и использовались в прикладных работах. Эти результаты Ю.Б. Гермейера послужили отправным пунктом для последующих обобщений и расширений его учениками и последователями. Значительная часть этих исследований была обобщена в классической монографии “Введение в теорию исследования операций” (М., 1971 г.).

С начала 70-х гг. ведущим направлением его научной работы стала теория игр с непротивоположными интересами. Был выделен практически важный класс игр с иерархической структурой, характерной для большинства экономических систем. Был сформулирован ряд

задач по оптимизации работы системы Центр-Производители при несовпадении их интересов. На конкретном примере показано, что управление Центра с помощью распределения ресурсов между Производителями может быть неэффективно. Вместе с тем показывается полная управляемость Производителями при использовании управления вида штрафа-поощрения в линейной постановке. Было дано систематическое описание задачи распределения экзогенных ресурсов и задачи определения штрафной функции.

Для моделирования процессов принятия решений в иерархических системах управления было предложено использовать игры с фиксированным порядком ходов и передачей информации. Традиционные ситуации равновесия по Нэшу не отражают суть таких игр. Адекватным принципом оптимальности в них является принцип наибольшего гарантированного результата. Описан ряд игр и приведены теоремы о значении игр и оптимальных стратегиях в них. По существу, никто до Ю.Б. Гермейера не изучал вопроса о взаимной информированности игроков об их интересах, а без этого теория игр не может правильно отражать реальные ситуации, когда истинные интересы нередко сознательно скрываются. Ю.Б. Гермейер исследовал значение взаимной информированности игроков о ходах друг друга. Тщательно были изучены игры двух лиц. В основной доказанной здесь теореме утверждается, что в определенном классе задач оптимальным является добровольное сообщение своего поведения и использование введенной Ю.Б. Гермейером стратегии наказания, то есть выбор поведения, наихудшего для игрока нижнего уровня иерархии. Понятие стратегии наказания оказалось чрезвычайно плодотворным в дальнейших исследованиях по теории игр, а именно в теории метаигр и при обеспечении устойчивости решения в повторяющихся играх. Стратегия наказания - наглядный пример взаимного обогащения гуманитарной практики и формальных конструкций прикладной математики. В человеческом обществе для целей управления широко применяется принцип кнута и пряника. Ю.Б. Гермейер дал формальное математическое доказательство оптимальности такой стратегии для определенных классов игр. Ю.Б. Гермейер дал решение некоторых игр с запрещенными ситуациями и игр с неточно известными интересами партнеров. Теория иерархических систем с несовпадающими интересами, основы которой Ю.Б. Гермейер заложил совместно с Н.Н. Моисеевым, в настоящее время стала сильно разветвленной областью.

Исключительно плодотворной оказалась работа, в которой были введены модели Гермейера-Вателя. Члены сообщества распределяют имеющиеся у них ресурсы между различными объектами. Целевая функция каждого участника отражает уровень обеспеченности ресурсами объектов из некоторого списка — своего для каждого участника. Было показано, что в такой модели существует сильное равновесие, являющееся для каждого игрока наилучшим равновесием по Нэшу. Организованные Н.Н. Моисеевым в середине 80-х гг. исследования установили ряд других замечательных свойств модели Гермейера-Вателя, а также ее далеко идущих обобщений.

Он продолжил изучение способов формирования различных целевых функций в задачах исследования операций, которые могут быть сведены к тому или иному типу игры  $n$ -лиц. Рассмотрены приемы формирования целей с иерархическим вектором интересов. Значителен его вклад в изучение игр с повторениями. Была исследована проблема устойчивости коллективных решений и дано обобщение понятия ситуаций равновесия, а также была установлена неустойчивость классических решений в кооперативных играх. Исследованию подверглась проблема блефа с выделением понятий корректного и некорректного обмана. Основные материалы по теории игр с непротивоположными интересами обобщены в монографии "Игры с непротивоположными интересами" (М., 1976 г.).

**3.** После кончины Ю.Б. Гермейера в 1975 г. отдел исследования операций возглавил И.А. Ушаков — известный ученый, специалист по теории надежности технических систем. И.А. Ушаков прошел путь, характерный для многих известных специалистов по исследованию операций: окончив в 1958 г. Московский авиационный институт, он начал работать в авиационных и радиотехнических КБ. Успешное решение сложных технических проблем и задач приводило к появлению новых интересных научных результатов, многие из которых можно рассматривать как краеугольные камни методологии исследования операций. И.А. Ушаков в 1963 г. защитил кандидатскую диссертацию, в 1968 г. — докторскую, в 1974 г. ему присвоено звание профессора.

И.А. Ушаков возглавлял кафедру “Больших систем” факультета управления и прикладной математики Московского физико-технического института. Кафедра была создана Н.П. Бусленко, который, будучи известным специалистом по исследованию операций и имитационному моделированию, возглавлял большой НИИ Министерства обороны.

И.А. Ушаков много сил отдавал работе в “Кабинете надежности” при Государственном политехническом музее, где вместе с другими сотрудниками отдела исследования операций читал циклы лекций и проводил бесплатные консультации для инженеров прикладных специальностей при кабинете надежности.

И.А. Ушаков уделял большое внимание международным связям, был заместителем председателя Комитета по исследованию операций, созданного Н.Н. Моисеевым при АН СССР. Он являлся также официальным представителем СССР в IFORS (Международная федерация обществ исследования операций).

И.А. Ушаков разработал: методы оценки эффективности функционирования сложных технических систем с учетом надежности; аналитические и численные методы решения задач оптимального резервирования (в том числе задачи обеспечения технических систем запасными элементами); методы граничных оценок характеристик надежности систем со сложной структурой; новые методы оптимизации функционалов, характеризующих функционирование системы и заданных алгоритмическим описанием, основанные на использовании имитационного моделирования; методы количественного анализа систем управления с ветвящейся иерархической структурой; методы декомпозиции сложных задач надежности, связанных с оценкой эффективности их функционирования. Также им решены задачи оптимального управления процессами технического обслуживания систем (оптимизация процедур контроля и поиска отказов), проведены расчеты практических оптимизационных и расчетных задач, связанных с проектированием и эксплуатацией системы связи и системы энергетики.

Под его руководством расширилась тематика исследований и были получены интересные результаты в области теории управления запасами, теории оптимального резервирования и массового обслуживания, теории адаптивного управления и методов стохастической оптимизации, методов анализа систем по данным эксперимента и имитационного моделирования. И.А. Ушаков инициировал деятельность по внедрению полученных результатов в практику проектирования технических систем, благодаря его усилиям проводились работы с рядом отраслевых институтов.

В 1985 г. под редакцией И.А. Ушакова был издан фундаментальный справочник “Надежность технических систем”, в котором были представлены основные разделы и результаты теории надежности на тот период и который широко использовался в инженерной практике в различных прикладных областях, таких как системы энергетики (в том числе атомной), радиоэлектронные системы связи и управления, биомедицинская аппаратура и др.

В этот же период времени И.А. Ушаковым и сотрудниками лаборатории исследования операций был проведен ряд совместных работ с Сибирским энергетическим институтом СО АН СССР по надежности и живучести больших территориально распределенных систем энергетики и др. В 1986 г. опубликован справочник “Надежность систем энергетики” (совместно с Ю.Н. Руденко).

Одно из важных направлений исследований, проводившихся в отделе, связано с оценками и прогнозом характеристик надежности сложных систем по результатам испытаний различных компонент. Данная проблема возникает, в частности, на этапе проектирования системы, когда испытания системы как единого целого по ряду причин затруднительны или вообще невозможны. Аналогичная задача возникает в ситуации, когда система находится в состоянии непрерывного развития и требуется оценить характеристики различных вариантов на основе статистической информации по уже имеющимся ее фрагментам.

Еще одно направление работ было связано с проблемой принятия оптимальных статистических решений по ходу испытаний системы (или ее отдельных компонент) в последовательной схеме наблюдений. Классический последовательный анализ Вальда не работает в многопараметрических задачах, возникающих при испытаниях сложных многокомпонентных систем или их отдельных частей. Для решения указанных прикладных задач были разработаны асимптотически оптимальные последовательные процедуры принятия решений и доверительного

оценивания для функций многих неизвестных параметров, обобщающих, в частности, известные последовательные планы Вальда на случай сложных многопараметрических гипотез. Другими приложениями разработанных методов являются последовательные статистические выводы для многократно цензурированных выборок, а также в задачах статистического контроля качества и надежности. Полученные в этом направлении результаты были опубликованы в совместной монографии Б.В. Гнеденко, И.В. Павлова и И.А. Ушакова “Statistical Reliability Engineering” (N.Y., 1999 г.).

Проблема управления марковскими последовательностями (в зарубежной терминологии — марковский процесс принятия решений) является одним из наиболее важных, заметных и популярных разделов традиционной тематики исследования операций. В этой области был получен ряд результатов, касающихся как базовой постановки задачи, так и ее обобщений.

Были обнаружены конструктивные формулы для градиента предельного среднего дохода в пространстве рандомизированных стационарных марковских стратегий для конечных и счетных эргодических управляемых марковских цепей. Наличие этих формул открыло прямую возможность разнообразного применения градиентного подхода как альтернативы классическим методам, основанным на динамическом или линейном программировании. Особый интерес к такому подходу обусловлен возможностью его применения в ценных с практической точки зрения обобщениях, связанных с неполным наблюдением, децентрализацией и распределенным характером управления, отсутствием информации о переходных матрицах процесса.

Последний упомянутый фактор порождает постановки задач, не менее традиционно относящиеся к исследованию операций и связанные с управлением (принятием решений) в условиях неопределенности. (Подобные постановки характерны также для теории адаптивного управления.) В этом направлении были получены теоретические результаты, касающиеся управления различными классами случайных последовательностей с дискретными множествами состояний и управлений, а также анализа метода перебора в адаптивном управлении.

Проблема адаптивного управления марковскими последовательностями активно изучалась также применительно к классам процессов с общими пространствами состояний и управлений. Так, были разработаны новые алгоритмы адаптивного управления с целью максимизации предельного среднего дохода такими марковскими последовательностями, для которых указанные множества являются борелевскими пространствами. Эти алгоритмы (в том числе их версии, относящиеся к нестационарным процессам), используют эмпирические распределения случайных векторов и основаны на построении аппроксимационных последовательностей для оптимизационных задач с дисконтированием. Выбор параметров аппроксимации базируется на использовании понятия колмогоровской энтропии компактов, а также на оценках скорости сходимости эмпирических распределений.

**4.** В 1991 г. И.А. Ушаков уезжает на преподавательскую работу в США, и отдел возглавляет д.ф.-м.н. Ю.Е. Малашенко. Он пришел в ВЦ АН СССР в 1969 г. как студент-дипломник факультета управления и прикладной математики МФТИ (декан и заведующий одной из кафедр — Н.Н. Моисеев). Официальным рецензентом на защите диплома Ю.Е. Малашенко в 1970 г. был Ю.Б. Гермейер, который рекомендовал его в аспирантуру. В ВЦ АН СССР состоялась защита и кандидатской, и докторской диссертаций Ю.Е. Малашенко.

Еще в конце 80-х гг. в недрах оборонных НИИ была создана целевая лаборатория, сотрудники которой, с одной стороны, выполняли конкретные оборонные проекты, а с другой — тесно сотрудничали с академическими институтами, прежде всего с ВЦ АН СССР. Большая доля работ была связана с моделированием и оптимизацией сложных систем, имеющих сетевую, территориально распределенную структуру. Кроме того, особое внимание уделялось теории принятия решений одновременно в условиях неполной информированности и наличия многих критериев. Также важное место в научных интересах коллектива занимала теория и разработка численных методов исследования операций. В практическом плане рассматривались проблемы анализа и синтеза, надежности и живучести телекоммуникационных и топливно-энергетических сетей, методы решения статистических, оптимизационных и теоретико-игровых задач.

В 80-х гг. было накоплено много фактического материала и разработано несколько программных комплексов для синтеза сетей связи, анализа живучести топливно-энергетического

комплекса, надежности различных сложных технических систем. Резкое свертывание исследований вообще, и в оборонных отраслях в частности, дало возможность в последние годы глубже и подробнее проанализировать сформулированные ранее модели и постановки, что позволило выявить их принципиальные особенности и новизну. Были проведены глубокие теоретические исследования, в результате которых удалось разработать модель анализа эффективности и живучести многопродуктовой сети. Впервые в одной модели использованы многие классические конструкции и методологические подходы исследования операций: потоки в сетях, теория игр, максиминные оценки ущерба, оптимизация, гипотезы об информированности противника и его поведение, направленное на нанесение максимального ущерба.

При изучении многокритериальных игровых задач с рекурсией применялась современная методология исследования операций и теории игр, а именно введенный Ю.Б. Гермейером, гибко понимаемый принцип гарантированности результата с учетом всей имеющейся и ожидаемой информации о неопределенности. Это породило новую концепцию векторного минимакса, предполагающую конкретизацию игрока, за которого проводят исследование. Был предложен оригинальный алгоритм решения двухэтапных стохастических и игровых задач управления потоками в многопродуктовых потоковых сетях со случайными параметрами. Алгоритм базируется на применении метода потенциальных функций к двойственной задаче. Проведено обобщение алгоритма на линейные стохастические игровые задачи с рекурсией, а также линейные стохастические задачи с блочной структурой матрицы ограничений.

Изучены постановки двухэтапных задач принятия решений с неизвестной (неточно или не полностью известной) функцией распределения случайных факторов. Получено нетривиальное обобщение теоремы Гермейера о виде экстремальных функций распределения (реализующих гарантированные оценки средних значений) при известных границах на конечное число моментов — для оцениваемых функций индикаторного типа, т.е. разрывных. Найдено явное решение задачи управления потоками в многопродуктовых сетях со случайной пропускной способностью, для которой известно математическое ожидание и ограничения на дисперсию.

Предложен оригинальный метод учета бесконечного числа ограничений в произвольных задачах полубесконечной оптимизации — комбинированный метод агрегирования ограничений и ргох-регуляризации. Доказан результат о линейной скорости сходимости метода.

Для двухэтапных стохастических игровых задач произвольной природы в общем выпуклом случае обоснована возможность применения и доказана сходимость комбинированного метода агрегирования ограничений и ргох-регуляризации. Проведено сравнительное исследование сходимости при агрегировании ограничений по сравнению с их штрафованием или с прямым применением метода стохастических квазиградиентов. В частности, для стохастических задач с ограничениями, которые должны выполняться почти наверное, в выпуклом случае доказана сходимость стохастического аналога метода с агрегированием ограничений и ргох-регуляризацией, ранее не известная.

Для бесконечномерных задач с операторными ограничениями в сильно выпуклом случае обоснована возможность применения и доказана сходимость комбинированного метода агрегирования ограничений и итеративной аппроксимации. Изучены свойства практической сходимости. К сожалению, теоретически подтвердить регуляризирующие свойства метода в общем выпуклом случае не удалось, поскольку итеративная ргох-регуляризация не обеспечивает сильной сходимости.

Для линейных стохастических задач с конечным множеством значений случайных факторов предложен новый метод, являющийся прямо-двойственным, и для него доказана неулучшаемая по порядку (на рассматриваемом классе задач) оценка скорости сходимости. Указанный результат допускает обобщение на многоэтапные стохастические задачи [Н.М. Новикова. *Iterative Stochastic Methods for Solving Variational Problems of Mathematical Physics and Operational Research* (N.Y., 1993)].

Результаты, полученные для линейного и сетевого случаев, позволяют перейти к рассмотрению многошаговых постановок.

Предложен прямо-двойственный метод агрегирования линейных ограничений для многопериодной задачи стохастического программирования, на его основе разработан метод решения динамической задачи управления портфелем (с линейными ограничениями и квадратичной



функцией полезности). Метод позволил написать программу решения задачи для персональной ЭВМ, несмотря на ограничения по памяти, за счет декомпозиции — сведения к последовательности задач меньшей размерности. Проведено сравнительное исследование различных стратегий агрегирования для пятишаговой задачи с 500 переменными.

В динамической задаче стохастического программирования для бинарного дерева сценариев (двух возможных значений случайного фактора на каждом шаге принятия решений) предложена аппроксимационная схема, позволившая построить приближенный метод с улучшенной оценкой вычислительной сложности: на порядок по числу узлов сетки. Построены алгоритмы метода для задачи оценки стоимости экзотических опционов.

Для случая непрерывной вероятностной меры построены стохастические алгоритмы решения задач стохастической оптимизации и поиска стохастической седловой точки — при наличии ограничений, выполняющихся почти наверное. Такие ограничения приводят к задаче полубесконечной оптимизации (с бесконечным числом ограничений), требующей разработки специальных численных схем.

Для задач оптимизации в бесконечномерном пространстве, не являющихся сильно выпуклыми, в том числе для постановок, возникающих при сведении стохастических игровых задач с рекурсией к оптимизационным в случае бесконечного множества значений случайного фактора, предложена схема итеративной аппроксимации, комбинированная с методом агрегирования ограничений при использовании регуляризации по Тихонову. Доказана сильная сходимость полученного в результате применения данной схемы алгоритма.

Для сетевых постановок, являющихся многокритериальными с вектором критериев — мультипоток, рассмотрены двух- и многоэтапные игровые задачи (с рекурсией). Разработана концепция решения таких задач и идея построения методов аппроксимации решения. Поставлена задача формализации влияния случайных факторов. Проведен теоретический анализ ряда модельных игровых ситуаций для сетевых задач с учетом случайных факторов. Изучена специфика влияния сетевой структуры матрицы ограничений на свойства решения для трехпродуктовых сетей.

Построены методы решения задачи на векторный минимум со связанными ограничениями, в том числе для сетевого случая. При определенных условиях в линейных задачах предложено сведение векторного минимума к векторному максимуму, что позволяет применять для сетевых задач на векторный минимум известные методы аппроксимации эффективного множества, разработанные в линейном случае. Формально рассмотрена задача поиска максимина векторной функции. Обоснована возможность параметризации множества, соответствующего реализации внешнего максимума, через максимин произвольной свертки из стандартного двухпараметрического семейства. В результате оказывается возможным сузить множество стратегий противника (максимизирующего игрока) до множества наихудших стратегий в смысле реализации максимина какой-либо из традиционно используемых в векторной оптимизации сверток.

Дана концептуальная основа создания математических моделей функционирования сложных территориально распределенных сетевых систем многих пользователей. Указано на важность учета неопределенных факторов при моделировании подобных систем. Предложено описание субъективной и объективной неопределенности, характерной для сетевых задач. Принцип наилучшего гарантированного результата последовательно применен для сетевых задач многокритериальной оптимизации со случайными и неопределенными неконтролируемыми факторами.

Предложен новый принцип управления потоками в сетевых потоковых системах, объединяющих многих пользователей. Принцип позволяет сочетать идею конкурентного распределения потоков, не дискриминирующего отдельных пользователей, и стремление к эффективности (Парето-оптимальности) итогового решения, характерное для распределений, максимизирующих суммарный поток. Доказана устойчивость суперконкурентного решения по отношению к небольшим изменениям количественных параметров сети. Предложены численные методы поиска суперконкурентного распределения.

Разработан оптимизационный вариант модели сети московского метрополитена, и проведены расчеты для анализа возможностей сети по обеспечению пассажиропотока при крупномасштабных авариях.

Создан комплекс математических моделей анализа уязвимости многопользовательских систем, обладающих сетевой структурой связей. Построены методы решения задач на векторный минимакс со связанными ограничениями для линейного случая, в том числе для сетевого. В линейных задачах обосновано сведение векторного минимакса к векторному максимуму, что позволяет применять для поиска векторного максиминимакса методы поиска векторного максимина и векторного максимума. Расшифровано понятие векторного минимакса задачи анализа уязвимости: с известным и с неизвестным вектором требований пользователей. Сформулирована гипотеза о том, что в задаче нормативного анализа уязвимости множество, соответствующее оптимуму (наилучшему гарантированному результату), определяется лишь по значениям нижнего уровня обеспеченности потоковых требований для стратегий, дающих минимум. Проведен сравнительный анализ уязвимости модельных сетей, демонстрирующий принципиальную новизну предложенного подхода к задаче об уязвимости сетевых систем.

Поставлена задача формализации понятия живучести сетевых многопользовательских систем как максиминимакса вектора мультипотока в многопродуктовой потоковой сети. Разработана концепция использования принципа наилучшего гарантированного результата для определения векторного максиминимакса. Дан аналитический обзор теоретико-графовых подходов к определению живучести. Поставлена и изучена задача анализа живучести сетевых систем при наличии случайных факторов как задача о гарантиях допустимости сети с заданной вероятностью для различных вариантов неполной информированности о функции распределения.

Поставлена задача оптимизации уязвимости, т. е. повышения гарантированных оценок качества функционирования, в форме многокритериального максимума для точечно-множественного отображения (поскольку указанные оценки представляют собой множество — значение векторного минимакса мультипотока). Предложена формализации понятия живучести сетевых многопользовательских систем как максиминимакса вектора мультипотока в многопродуктовой потоковой сети. Разработана концепция использования принципа наилучшего гарантированного результата для определения векторного максиминимакса, и показано, что при этом задача исследования живучести совпадает с оптимизацией уязвимости. Последний результат основан на новом математическом аппарате многокритериальной оптимизации для точечно-множественных отображений, который позволил доказать для вектор-функций равенство максимина от максимума и максимума от минимакса (оптимизация понимается в смысле бинарного отношения порядка среди векторов в критериальном пространстве, в частности мультипотоков).

Построены методы параметризации и аппроксимации значения и решения задачи на векторный максиминимакс со связанными ограничениями, основанные на обратной логической свертке. Проведено отдельное исследование для нерегулярного случая, в частности для сетевого. Доказано, что решение задачи живучести сетевых многопользовательских систем может быть построено путем параметрической оптимизации гарантированного уровня обеспеченности требований на пропускаемые по сети потоки, когда параметром является вектор требований. Исследована живучесть трехпродуктовых сетей. Поставлена задача гарантированного оценивания живучести сетевых систем, как задача поиска двукратного векторного минимакса, изучены свойства подобных задач. Показано, что, несмотря на линейность модели сети, рассматриваемые сетевые минимаксные и максиминимаксные задачи оказываются переборными (множество решений не будет выпуклым).

Построены методы параметризации и аппроксимации по Хаусдорфу решения задачи на векторный максиминимакс со связанными ограничениями, основанные на обратной логической свертке. Проведено отдельное исследование для нерегулярного случая, в частности и для сетевого. Доказано, что регулярность эквивалентна непрерывности обратной логической свертки. Для нерегулярного случая доказано существование непрерывного продолжения обратной логической свертки и обоснован способ его использования при аппроксимации. А именно указан метод построения сети на множестве параметров, гарантирующей заданную точность аппроксимации вне зависимости от условий регулярности.

Формализовано новое понятие нормативной (при заданном векторе требований) живучести многопользовательских сетевых систем как максиминимакса диаграмм обеспеченности потоковых требований. Исследован класс иерархических сетей (веерного типа) и класс кольцевых сетей с точки зрения возможности обеспечения нормативной живучести. Изучена как норма-

тивная, так и многокритериальная живучесть трехпродуктовых сетей, что позволило выявить связь между диаграммными и векторными (по критерию максимизации мультипотока в случае неизвестного вектора требований) характеристиками живучести и уязвимости сетевых систем. Указанные характеристики оказались взаимно дополняющими и более соответствующими со-держательной стороне задачи уязвимости, чем традиционные графовые показатели.

Обосновано применение обратной логической свертки для аппроксимации значения и реализации кратного векторного минимакса. Изучена задача гарантированного оценивания живучести сетевых систем как задача поиска двукратного векторного минимакса.

Формализовано понятие структуры, устойчивой к неопределенности, как такой, при которой система лучше сохраняет свои функциональные возможности в условиях частичного разрушения структурообразующих элементов системы, в частности, когда качество функционирования пропорционально единице минус коэффициент относительного разрушения. Дана математическая постановка задачи поиска структур, устойчивых к неопределенности, в виде двухэтапной векторной оптимизации с комбинаторной постановкой.

Предложена и теоретически обоснована интерактивная процедура поддержки принятия решения по выбору структур, устойчивых к неопределенности, базирующаяся на методе референтной точки с использованием обратной логической свертки. Исследована возможность обновления точки status quo в предложенной интерактивной процедуре. Для обычной векторной оптимизации проведено сравнение данной процедуры с интерактивной процедурой, базирующейся на использовании точек, ближайших к референтным в чебышевской метрике.

Исследована проблема неопределенности как природной, так и вытекающей из целенаправленной деятельности противника, имеющего вектор целей, противоположных критериям оперирующей стороны. Сформулированы соответствующие игровые многокритериальные задачи в форме антагонистической игры для природной неопределенности и игры с нулевой суммой в случае сознательного противника. Для базовых теорем о существовании решения скалярных игр двух лиц с противоположными интересами найдены необходимые и достаточные условия их выполнения для указанных векторных игр: антагонистической и с нулевой суммой. Сделан сравнительный анализ постановок с целью перехода далее к двухэтапной (двухшаговой) игре.

Разрабатываемая концепция применена к проблеме синтеза по критерию живучести многопродуктовых сетей. Решена задача создания резервной структуры для обеспечения устойчивости к неопределенности иерархической сети с веерной структурой связей в многокритериальной двухэтапной постановке для случая нормативных требований. Доказано, что в задаче синтеза многопродуктовой сети с кольцевой структурой связей кольцевая структура сети является более устойчивой к неопределенности, чем линейная или звезда (сравнимые по числу ребер). Предложена дифференциация понятия структурной устойчивости в отношении природной неопределенности и по отношению к сознательному противодействию. Разработан математический аппарат теории многокритериальных игр, позволяющий формально различать указанные два типа неслучайных неконтролируемых факторов. Для обоих типов поставлена задача синтеза как максиминимаксная многокритериальная задача. Изучены различия решений в общем виде в зависимости от типа неопределенности. Часть описанных результатов нашла свое отражение в книге Ю.Е. Малашенко и Н.М. Новиковой "Модели неопределенности в многопользовательских сетях". М., 1999.

Исследовано влияние структурных особенностей электрической сети ЕЭС России и требований к устойчивости электрического режима (при учете возможности выхода из строя генерирующих мощностей и элементов сети) на величину резервной мощности и традиционную структуру резерва.

Решена задача синтеза по критерию живучести вторичной сети междугородной телефонной связи на примере сети связи России.

Разработаны алгоритмы оптимизации маршрутных таблиц и выбора дополнительных управляющих воздействий для широкого класса сетей, работающих по принципу коммутации каналов. Эти алгоритмы позволяют оперативно реагировать на всевозможные возмущения в параметрах трафика, а также на структурные изменения сетевого графа.

Разработана многофункциональная математическая модель многопользовательских сетей, предназначенная для анализа структуры, определения вероятностно-временных характеристик и

оптимизации управления трафиком. Модель позволяет получать решения статических сетевых задач и проводить исследование динамики процессов распространения трафика, в том числе в условиях неопределенности и нестационарности параметров сети. В модели реализованы разработанные методы оценки уязвимости и оптимизации структуры по критериям уязвимости, а также алгоритмы динамической маршрутизации. На базе математической модели создана компьютерная программа, позволяющая имитировать работу телефонной сети большой размерности, а также находить оптимальные решения по оперативному управлению трафиком.

Программа и использованные в ней алгоритмы успешно прошли тестирование на ряде реальных сетевых структур, в том числе большой размерности.

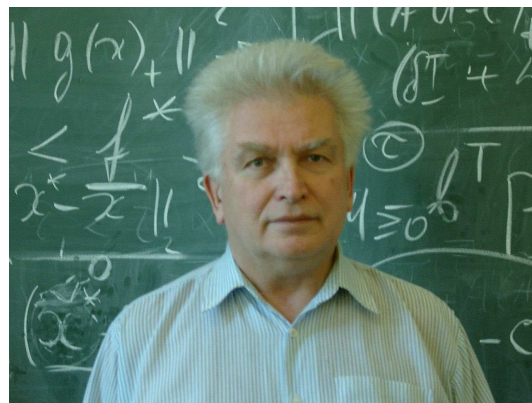
Подтверждена возможность использования предложенных разработок для выработки решений на стадии проектирования междугородной телефонной сети страны, а также для оперативного управления ею в реальном времени. Построена потоковая многопродуктовая модель междугородной телефонной сети России. Предложенные алгоритмы определения средних характеристик потоков и оптимизации их перераспределения тестированы с помощью компьютерной реализации модели.

Рассмотрена проблема анализа функционирования многопродуктовой сети при условии выхода из строя (полностью) одного или нескольких ребер, так что передача потока хотя бы для одной тяготеющей пары становится невозможной. При этом считается, что в неповрежденной сети все требования на передачу потока удовлетворяются, а количество обслуженных требований в сети уменьшается в зависимости от степени ее разрушения. Критерием эффективности функционирования сети выбрана гарантированная оценка ущерба пользователей этой сети. Для анализа функционирования предложен ряд формальных постановок в виде двухкритериальных лексикографических задач оптимизации. Выделены случаи, когда данные постановки полиномиально разрешимы и указаны соответствующие алгоритмы. Для остальных случаев исследована возможность использования свойств простых разрезов графа сети.

## ОТДЕЛ ПРИКЛАДНЫХ ПРОБЛЕМ ОПТИМИЗАЦИИ

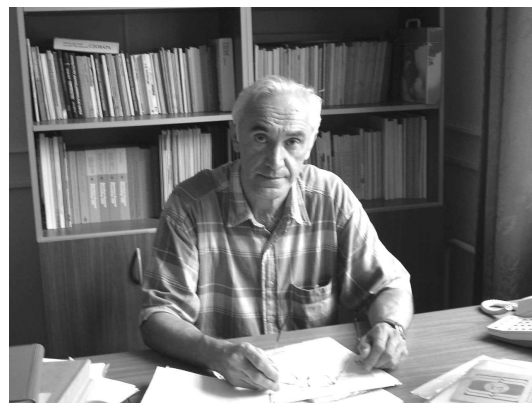
*Ю.Г. Евтушенко, В.Г. Жадан*

В 1978 г. в составе лаборатории “Исследование операций” был организован сектор прикладных проблем оптимизации. В 1984 г. на базе этого сектора был создан отдел с тем же названием. Указанный сектор (впоследствии отдел) возглавил Ю.Г. Евтушенко. В 1989 г. Ю.Г. Евтушенко был избран директором ВЦ АН СССР. По инициативе А.А. Абрамова Ученый совет института вынес решение, запрещающее директору совмещать свою работу с руководством какого-либо отдела. Представлялось, что в таком случае директор будет более справедливо распределять вычислительную технику, финансы и прочие “блага” среди всех отделов института. В связи с этим решением в 1989 г. заведующим отделом был избран В.П. Мазурик, а после его отъезда в Великобританию в 1993 г. отдел прикладных проблем оптимизации возглавил В.Г. Жадан. Все это время Ю.Г. Евтушенко остается неформальным научным руководителем отдела.



*Первый заведующий отделом  
Ю.Г. Евтушенко*

Основными направлениями работы отдела с момента его создания были и остаются до настоящего времени следующие: теория и численные методы оптимизации, создание соответствующего софтвера, решение прикладных задач. Сотрудниками отдела за прошедшие годы были получены важные результаты во многих областях оптимизации: линейное и нелинейное программирование (ЛП и НЛП), поиск глобального экстремума, быстрое автоматическое дифференцирование, теория и численные методы решения задач дополненности, равновесное и игровое программирование, многокритериальная оптимизация, методы внутренней точки, теоремы об альтернативах и их применение в численных расчетах, методы решения задач ЛП большой размерности, параллельные вычисления, методы решения задач оптимального управления и оптимизация систем с распределенными параметрами. Большую известность приобрели программные продукты, созданные сотрудниками отдела.



*Заведующий отделом с 1993 г.  
В.Г. Жадан*

Среди них диалоговая система оптимизации ДИСО и созданные Е.Н. Веселовым популярный в стране текстовый редактор ЛЕКСИКОН и инструментальная система МАСТЕР, комплексы программ для различных типов ЭВМ решения задач линейного программирования ЛП-БЭСМ-6, ЛП-СМ4 и ЛП-ПК. Успех этих программных разработок определялся тем, что их совместно создавали специалисты в области оптимизации и вычислений и коллектив замечательных системных программистов во главе с В.П. Мазуриком и Е.Н. Веселовым.

В первоначальный состав сектора входило 7 человек: Ю.Г. Евтушенко, В.Г. Жадан, А.И. Голиков, В.П. Мазурик, Н.И. Грачев, А.П. Черенков и В.П. Пуртов. В дальнейшем отдел расширялся, достигнув своего максимума в конце 80-х гг. (около 40 человек). В эти годы отдел состоял из 4 секторов: “Прикладные системы для персональных ЭВМ” (заведующий В.П. Мазурик), “Математическое обеспечение проектирования” (заведую-

щий А.А. Станевичюс), “Методы оптимизации” (заведующий В.Г. Жадан), “Вычислительные методы томографии” (заведующий Н.И. Грачев).

До создания сектора прикладных проблем оптимизации Ю.Г. Евтушенко работал в отделе “Методы оптимизации и теория управления” под руководством Н.Н. Моисеева, а с 1973 г. — в отделе “Теория и методы автоматизации проектирования”, возглавляемом П.С. Краснощековым. Научная тематика этих отделов оказала большое влияние на направление работ отдела прикладных проблем оптимизации. На рубеже 60–70-х гг. отдел Н.Н. Моисеева активно работал над созданием численных методов решения задач оптимального управления. Итоги этих исследований приведены в монографии [1], написанной Н.Н. Моисеевым в 1971 г. В ней дано подробное изложение разнообразных численных схем, идущих от методов оптимального управления, и лишь вскользь указано на возможность иного подхода, основанного на использовании методов нелинейного программирования (НЛП). Именно этот подход нашел самое широкое распространение в практике инженерных расчетов в последующие годы. Ему было посвящено наибольшее количество публикаций, он был основным инструментом, используемым в отделе прикладных проблем оптимизации при решении задач оптимального управления. Первые результаты, полученные в этой области, приведены в книге Ю.Г. Евтушенко [2], в статьях [3–5], где управление аппроксимировалось кусочно-постоянными функциями и таким образом проводилась редукция задач оптимального управления с фазовыми ограничениями и краевыми условиями к задачам НЛП.

В 1973–1978 гг. Ю.Г. Евтушенко совместно с Н.И. Грачевым, работавшим тогда в конструкторском бюро им. П.О. Сухого, апробировали эту новую методологию на практических задачах проектирования самолета. В результате были успешно решены сложные задачи оптимального конструирования шпангоутов, имеющих наименьший вес и выдерживающих заданные нагрузки, а также задачи оптимизации траекторий полета самолета с учетом приемистости управления (тяга двигателя, углы атаки и тангажа, положение тормозных щитков). В обеих задачах фазовые ограничения учитывались с помощью техники НЛП. В составе большого коллектива научных работников ВЦ АН СССР и конструкторского бюро им. П.О. Сухого, принимавших участие в разработке системы автоматизированного проектирования, Ю.Г. Евтушенко и Н.И. Грачев за эти работы были удостоены Премии Совета Министров СССР.

Методы решения задач оптимального управления (ОУ), базирующиеся на идеях НЛП, оказались чрезвычайно эффективными по многим причинам: с их помощью стали очевидными многие ранее предложенные эвристические алгоритмы, возникла возможность их обобщения, они позволили использовать богатый, всесторонне развитый арсенал методов НЛП и безусловной минимизации (БМ), создали конструктивную основу для построения методов оптимизации систем, проинтегрированных по схемам высокого порядка точности; методы НЛП позволили решать сложные задачи ОУ со смешанными ограничениями и создать библиотеку программ для решения таких задач (см. [6]).

Этот подход оказался применим к оптимизации сложных систем с распределенными параметрами. После дискретизации нет принципиального различия между управляемыми системами, описываемыми обыкновенными дифференциальными уравнениями, и системами с частными производными. В обоих случаях получаются однотипные многошаговые процессы, к которым в одинаковой степени применима техника НЛП. Полученные в этом случае задачи обладают (в отличие от обычных задач НЛП) одним замечательным свойством — в них сравнительно просто вычисляются первые и вторые производные целевых функций. Этим объясняется высокая эффективность градиентной техники оптимизации при решении таких задач. БАД-методология (БАД — быстрое автоматическое дифференцирование) была применена к решению задач оптимального управления системами, поведение которых описывается обыкновенными дифференциальными уравнениями с разрывными правыми частями [7, 8], к интегро-дифференциальным уравнениям [9]. В работе Н.И. Грачева, Ю.Г. Евтушенко [10] была установлена связь между методами теории сингулярных возмущений и методами отыскания минимаксных гарантированных оценок. Этот подход позволил численно решить задачу Айзекса о долихобрахистохроне [2].

В статьях [3] и [5] показано, что из формул вычисления градиентов для многошаговых процессов получаются формулы быстрого автоматического дифференцирования (БАД) функций

многих переменных. При этом вычисление значения функции сводится к многошаговому процессу, в котором введены новые фазовые переменные, являющиеся функциями независимых переменных, по которым ищутся производные заданной функции. Найдена верхняя оценка отношения времени вычисления производных функции ко времени вычисления значения функции. Показано, что если используется техника БАД, то время вычисления частных производных элементарных функций превышает время вычисления значения функций не более чем в три раза; при этом градиент вычисляется точно. Во многих случаях БАД значительно превосходит символическое дифференцирование или аппроксимацию производных с помощью разделенных разностей. Сотрудники отдела В.П. Мазурик и Е.Н. Веселов создали опытную версию системы ДИФАЛГ, реализующую идею автоматического дифференцирования на ЭВМ функций многих переменных, однако в связи с отъездом авторов за рубеж работа не была завершена.

Более удачной оказалась судьба приложения техники БАД к оптимизации систем с распределенными параметрами. Здесь благодаря самоотверженному труду В.И. Зубова и А.Ф. Албу был выполнен цикл работ, получены первоклассные результаты по оптимизации процессов плавления и кристаллизации, описываемых задачами Стефана. Существенной чертой таких задач являлось наличие движущейся поверхности раздела между двумя фазами (жидкой и твердой), причем закон движения этой поверхности заранее не известен и его следовало определять из расчетов. Именно на этой поверхности происходило поглощение или выделение тепла, связанное с фазовым переходом. При оптимизации управление выбиралось таким образом, чтобы либо сам процесс протекал по сценарию, наиболее близкому к заданному, либо поведение границы раздела жидкой и твердой фаз было наиболее близким к требуемому [11].

Решение задач находилось путем минимизации целевого функционала градиентным методом. Для вычисления градиента использовалась БАД-методология. Ограничения, накладываемые на решение задачи, учитывались с помощью метода штрафных функций. Для решения прямой задачи (определение поля температуры и траектории движения фронта раздела фаз при заданном управлении — мощности подводимого тепла) был разработан и реализован новый итерационный алгоритм.

Проводилось сравнение предлагаемого подхода с ранее известными алгоритмами. На примере решенных задач была показана эффективность нового подхода. Исследовались две вспомогательные задачи, которые можно рассматривать как фрагменты полной задачи:

1. Задача оптимального управления процессом плавления. Мощность источника выбиралась из того условия, чтобы была минимальной выделяемая им за время плавления энергия и была бы расплавлена заданная масса вещества. Тот факт, что выбранная мощность источника сказывается на процессе кристаллизации вещества, не учитывался.

2. При оптимизации кристаллизации вещества определялось такое распределение мощности источника, при котором процесс кристаллизации протекал бы не слишком быстро и выделенная источником энергия была бы минимальной. Как показали проведенные исследования, почти на всем этапе кристаллизации (исключая небольшие начальный и конечный участки) оптимальное управление определяется условием совпадения скорости движения фронта кристаллизации с максимально допустимой.

Для построения оптимального управления на этапе кристаллизации предложен итерационный алгоритм. Этот алгоритм позволил построить оптимальное управление с высокой точностью. Среди последних публикаций по применению БАД-методологии укажем работы [11–13].

В 70-е–80-е гг. в отделе прикладных проблем оптимизации разрабатывалась диалоговая система оптимизации ДИСО, в которой были представлены помимо общеизвестных новые методы, разработанные в отделе. В состав библиотеки ДИСО вошли программы, реализующие методы безусловной минимизации, нелинейного программирования, глобальной оптимизации, Парето-анализ и алгоритмы решения задач оптимального управления. Программная реализация различных версий была проведена для наиболее распространенных типов ЭВМ (БЭСМ-6, ЕС, СМ, ПК). Комплекс ДИСО представлял собой новое направление в развитии интегрированных систем модельной ориентации. В нем в рамках единой технологии был реализован целый спектр средств управления процессом решения задач, начиная от простейших возможностей ввода информации и кончая специальными средствами адаптации управления по заказу пользователей.

Существенным свойством системы ДИСО было то, что средства управления разрабатывались в условиях многомодельной иерархической архитектуры комплекса. Высокий уровень использования самых современных методов системного программирования при создании ДИСО был обеспечен профессионализмом В.П. Мазурика и Е.Н. Веселова. С помощью системы ДИСО были решены многочисленные практические задачи в следующих областях: проектирование силовых конструкций, радиофизика, геология, криогенная техника, моделирование и т. д. Эти расчеты часто проводились совместно со специалистами в соответствующих областях, что позволяло устранять отдельные недостатки комплекса и тем самым его совершенствовать. Ниже приводятся самые краткие сведения о некоторых новых методах оптимизации, полученных в отделе и реализованных в системе ДИСО.

В 1971 г. Ю.Г. Евтушенко опубликовал одну из первых статей [14], посвященную поиску глобального экстремума функций многих переменных с помощью неравномерных покрытий допустимого множества. Это направление в дальнейшем нашло плодотворное развитие. В статье [15] метод был перенесен на нахождение гарантированных оценок в многошаговых играх, в [16] — на построение эпсилон-сети паретовского множества. В статье [17], развивавшей метод неравномерных покрытий, был получен метод бисекций.

С начала 70-х гг. в отделе велись работы по построению методов внутренней точки для решения различных задач нелинейного программирования. Эти методы, будучи перенесенными на задачи линейного программирования, породили новый класс несимплексных методов. Поиск альтернатив симплекс-методу продолжается до сих пор. Первая работа в этом направлении была опубликована Ю.Г. Евтушенко в 1974 г. [18]. Почти сразу же к исследованию по этой тематике был привлечен В.Г. Жадан. В 70-е гг. ими были получены основные результаты, касающиеся общего подхода к построению методов внутренней точки для задач нелинейного программирования, содержащих как ограничения типа равенств, так и ограничения типа неравенств [19]. Данный подход основан на переходе с помощью сюръективных отображений к новым пространствам, в которых структура допустимого множества существенно проще, чем в исходном пространстве. Применяя различные методы условной оптимизации к преобразованной задаче, после возвращения в исходное пространство можно получить новые численные методы, являющиеся уже методами внутренней точки. В правых частях систем, описывающих метод, появляются дополнительные матрицы, которые специальным образом изменяют траектории, не позволяя им выходить за пределы ограничений типа неравенства. На основе метода проекции градиента и метода Ньютона были предложены новые методы, которые впоследствии были названы барьерно-проективными и барьерно-ньютоновскими. Первые результаты наших исследований в этом направлении были обсуждены и одобрены лауреатом Нобелевской премии Т. Купмансом, под руководством которого Ю.Г. Евтушенко работал в 1974–1975 гг. в Международном институте системного анализа ИАASA.

Большой резонанс в печати вызвали работы Л.Г. Хачияна — сотрудника отдела Г.С. Поспелова. Л.Г. Хачиян получил интересные оценки эффективности метода эллипсоидов Н.З. Шора, примененного к задачам ЛП. Эти результаты, хотя и не дали нового конкурентно-способного метода решения задач ЛП, однако вызвали большой поток работ по несимплексным методам.

Дальнейший интерес к методам внутренней точки проявился в отделе в конце 80-х гг. В 1984 г. после опубликования статьи Н. Кармакара, где он предложил полиномиальный алгоритм решения задачи линейного программирования, на Западе возник настоящий бум, посвященный методам внутренней точки. В потоке многочисленных публикаций на эту тему были и повторения ряда полученных нами результатов. Это побудило Ю.Г. Евтушенко и В.Г. Жадана вновь заняться этой тематикой и опубликовать свои результаты, главным образом, в зарубежных изданиях [20, 21]. При этом предыдущие результаты получили существенное дальнейшее развитие: были сформулированы необходимые и достаточные условия первого и второго порядка для задач нелинейного программирования, использующие технику преобразования пространств. Были предложены прямые, двойственные и прямо-двойственные барьерно-проективные и барьерно-ньютоновские методы решения задач линейного программирования; рассмотрены варианты методов, использующих наискорейший спуск для выбора шагов (при работе над этой проблемой принимал участие А.П. Черенков); были предложены конечные



методы решения задач линейного программирования, в которых возможен выход на границы допустимых множеств [22]. В последние годы В.Г. Жаданом вместе с аспирантами А.В. Люлько и М.В. Втюриной рассмотрены обобщения барьерно-проективных и барьерно-ньютоновских методов для решения линейных задач дополнителности.

В настоящее время в отделе найдены методы решения задач ЛП, конкурентноспособные с симплекс-методом и методами внутренней точки. А.И. Голиков, Ю.Г. Евтушенко и аспирант из Ирана Н. Моллаверди разработали метод, близкий к методу модифицированных функций Лагранжа и использующий обобщенный метод Ньютона, который дает возможность решать задачи ЛП большой размерности (порядка 50 миллионов переменных) при умеренном количестве ограничений (до четырех тысяч) [23]. В случае неединственности решения задачи ЛП этим методом можно получить проекцию заданной точки на множество решений задачи ЛП, т.е. точку, ближайшую к заданной. Время решения задач ЛП с миллионами переменных составляет от нескольких минут до полутора часов на компьютере Pentium-IV с памятью 1 Гб.

В течение ряда лет, начиная с середины 80-х гг., Ю.Г. Евтушенко и В.Г. Жаданом проводились исследования по применению разнообразных вспомогательных функций для методов условной оптимизации. Понятие вспомогательной функции обобщает в некотором смысле понятие функции Лагранжа и позволяет интерпретировать многие методы нелинейного программирования либо как процедуры отыскания минимумов специальным образом подобранных вспомогательных функций, либо как процедуры их минимизации в сочетании с решением систем нелинейных уравнений. Для построения вспомогательных функций были введены специальные свертывающие функции трех типов, которые позволили описать вспомогательные функции многих известных численных методов, а также указать нетрадиционные вспомогательные функции и получить новые численные методы. На базе предложенного подхода была проведена систематизация численных методов нелинейного программирования [24].

Среди вспомогательных функций особый интерес вызвали точные вспомогательные функции, однократная безусловная минимизация которых дает точное решение исходной задачи условной минимизации. В некотором смысле понятие точной вспомогательной функции обобщает хорошо известное в математическом программировании понятие точной штрафной функции. Как показали исследования, проведенные А.И. Голиковым, Ю.Г. Евтушенко и В.Г. Жаданом, свойство быть точной не является привилегией лишь штрафных функций, но и среди вспомогательных функций других методов, например методов центров (внутренних и внешних), имеются точные функции [25]. Впоследствии, на рубеже веков, эти результаты были существенно расширены в совместной работе Ю.Г. Евтушенко и В.Г. Жадана с профессором школы информационных технологий и математических наук университета г. Балларат (Австралия) А. Рубиновым [26]. Была построена общая теория вспомогательных функций и предложены новые необходимые и достаточные условия оптимальности для невыпуклых задач.

Развитый подход к построению вспомогательных функций оказался весьма плодотворным и позволил В.Г. Жадану в конце 80-х гг. перенести его на задачи обобщенного нелинейного программирования, а также на задачи многокритериальной оптимизации. Для последних задач он не пошел по пути предварительной свертки критериев и последующего использования методов нелинейного программирования, а вместо этого добавил свертывающую функцию, отвечающую за критерии, в саму вспомогательную функцию. Это позволило предложить новые численные методы, обобщающие соответствующие методы нелинейного программирования, и в которых в процессе итерации меняются целевые точки. Важным полезным свойством этих методов является то, что они позволяют строить точные сечения паретовского множества в критериальном пространстве, причем для общих невыпуклых задач [27]. Исследования, проведенные А.И. Голиковым и Г.Г. Коткиным, показали, что результаты, полученные в нелинейном программировании по теории функции чувствительности, дают чрезвычайно богатую информацию о свойствах множества Парето [28]. На основе этих исследований была создана система для решения многокритериальных задач нелинейного программирования ДИСО/ПК-МКО.

Ю.Г. Евтушенко, А.И. Голиковым и В.Г. Жаданом проводились исследования по модифицированным функциям Лагранжа [2]. Методы, основанные на их применении, широко применялись в системе ДИСО при решении многих практических задач НЛП. Особенно эффективным оказался разработанный А.И. Голиковым и В.Г. Жаданом прямой метод модифицированной

функции Лагранжа [29]. Этот метод очень часто требовал гораздо меньше вычислений функций, входящих в постановку задачи НЛП, чем другие методы. Тем самым общее время решения задачи НЛП могло быть существенно меньше, чем при решении традиционным двойственным методом модифицированной функции Лагранжа.

В самое последнее время А.И. Голиковым и Ю.Г. Евтушенко были выполнены исследования по теоремам об альтернативах и их применению в некоторых численных методах для решения задач большой размерности [30, 31]. Предложены и обоснованы новые методы нахождения нормального решения систем линейных равенств и неравенств; построения семейства гиперплоскостей, разделяющих два непересекающихся непустых полиэдра, заданных системой линейных неравенств или равенств; нахождения проекции заданной точки на множество решений задачи линейного программирования; вычисления наискорейшего спуска в задачах НЛП. Эти методы основаны на новых теоремах об альтернативах и использовании обобщенного метода Ньютона, примененного к задаче безусловной минимизации выпуклой кусочно квадратичной функции. Вычислительные эксперименты показали высокую эффективность разработанных методов, возможность решать задачи с очень большим количеством неотрицательных переменных (до 50 миллионов) и средним количеством линейных равенств (до четырех тысяч) для нахождения нормального решения линейной системы или нахождения проекции заданной точки на множество решений задачи линейного программирования, также строить семейство гиперплоскостей, разделяющих полиэдры, заданные большим числом линейных неравенств (несколько миллионов). Эти методы, реализованные иранскими аспирантами Н. Моллаверди и С. Кетабчи в системе MATLAB, решали указанные задачи на компьютерах Pentium-IV за время порядка десятков-сотен секунд.

В 1994 г. новый сотрудник отдела А.С. Антипин приступил к разработке методов решения равновесных и игровых задач. Эти проблемы формально представляли собой задачи вычисления неподвижных точек экстремальных отображений выпуклых, замкнутых множеств в себя. Они, в частности, включали в себя игры  $n$ -лиц с равновесием по Нэшу и их обобщения — системы задач выпуклого программирования. Переход от одной задачи выпуклого программирования к системам таких задач резко менял парадигму решения, теперь это не оптимальное, а равновесное решение, отражающее идею компромисса участников некоторой ситуации, интересы которых частично противоречивы. Выяснилось, что выпуклый анализ, развитый для исследования одной задачи выпуклого программирования, оказался явно недостаточным для анализа систем выпуклых задач. Поэтому были введены новые понятия задач равновесного и игрового программирования с функциональными и связанными ограничениями. Были выделены новые классы бифункций (функций двух векторных переменных): симметричные, антисимметричные и положительно полуопределенные функции; было показано, что классы равновесных и игровых задач, отвечающие симметричным и антисимметричным функциям, совпадали с хорошо известными классами оптимизационных и седловых задач.

Общий класс положительно полуопределенных выпуклых равновесных задач содержал задачи, которые расщеплялись на сумму оптимизационных и седловых задач [1, 2]. Если равновесная задача содержала функциональные, в частности связанные ограничения, то было установлено, что можно ввести функцию трех векторных переменных, играющую роль функции Лагранжа, используя которую равновесную задачу с ограничениями можно свести к задаче вычисления двойного седла на простых множествах. Этот факт был аналогом теоремы Куна–Таккера из выпуклой оптимизации. Показано, что задача вычисления равновесного и игрового решения сводится к задаче вычисления двойной седловой точки [3]. Для решения задачи с двойным седлом разработаны экстраградиентные, экстрапроксимальные, методы линеаризации [4], а также регуляризации [5] для задач, заданных с помехами. Доказана их сходимость, даны оценки скорости сходимости для острых и квадратичных равновесий. Предложенные методы можно рассматривать как перенесение на новые задачи идей методов модифицированных функций Лагранжа из выпуклой оптимизации.

Идеи градиентного, проксимального и ньютоновского шага из выпуклой оптимизации перенесены с дополнительным экстраполяционным шагом на решения игровых задач с равновесием по Нэшу [6]. В основе методов решения равновесных и игровых задач лежал класс положительно полуопределенных функций. Для исследования свойств этого класса было введено новое

понятия бидифференциала, которое представляло собой касательную седловую поверхность и тем самым обобщало понятие касательной плоскости из обычного выпуклого анализа. Получены теоремы о конечных приращениях для бидифференциалов [4]. Это перспективное научное направление было успешно применено для равновесного и игрового моделирования конфликтных ситуаций в экономике, экологии и других прикладных областях.

С 1985 г. по 1988 г. ряд сотрудников отдела (В.П. Мазурик, С.В. Андреев, Е.Н. Веселов, А.И. Голиков, И.В. Ежкова, В.Г. Жадан, В. Коршунов, Г.Г. Коткин, В.А. Пуртов, В.А. Ратькин, С.Г. Сироткин, А.Н. Фильков, П.Э. Шкляр, А.Ф. Яковлев) работали во временном научно-техническом коллективе (ВНТК) “Старт”. Этот коллектив был образован для создания макета системы “МАРС” с программно-аппаратными средствами интеллектуализации и для разработки соответствующего прикладного и программного обеспечения. Во главе всего коллектива стоял В.Е. Котов. Руководителем лаборатории “Прикладные системы для персональных компьютеров” Московского отделения ВНТК “Старт” являлся В.П. Мазурик, научным руководителем — Ю.Г. Евтушенко. Сотрудниками этой лаборатории совместно с другими сотрудниками отдела “Прикладные проблемы оптимизации” был разработан комплекс ДИСО/ПК, являвшийся достаточно эффективным для своего времени инструментом решения задач исследования операций, моделирования и оптимизации. В него вошли такие пакеты, как система программирования ДИФАЛГ, предназначенная для автоматизации процессов решения задач с нелинейными функциями и их производными; пакеты ДИСО/ПК-БМ, ДИСО/ПК-НЛП, ДИСО/ПК-МКО, ДИСО/ПК-ГЛОБ, ДИСО/ПК-ЛП, ДИСО/ПК-ОПТ, предназначенные для решения в диалоговом режиме соответственно задач безусловной минимизации, нелинейного программирования, многокритериальной и глобальной оптимизации, линейного программирования, задач оптимального управления с распределенными параметрами. Разработан был также ряд проблемно-ориентированных пакетов.

Сектор математического обеспечения проектирования был образован в декабре 1984 г. по инициативе Н.Н. Моисеева. Его возглавил А.А. Станевичюс. Задача, поставленная перед сектором, состояла в разработке математического и программного обеспечения задач оптимизации перспективного типажа сельскохозяйственных тракторов совместно с НИИ НАТИ министерства тракторного и сельскохозяйственного машиностроения при финансовой поддержке последнего. Задача была весьма сложной из-за необходимости учета большого числа разнообразных природных, технологических и технико-экономических факторов. Встал вопрос об информационной поддержке модели. Эта проблема была успешно решена Г.Н. Волошиным, О.А. Полукеевым и В.И. Черновым, которые создали иерархическую систему баз данных. Научным руководителем со стороны заказчика был В.И. Мининзон, координацию между сектором и заказчиком обеспечивали сотрудники НАТИ А.В. Тюленев и Т.А. Черевко.

Программа исследований сектора состояла в разработке и реализации методов решения задач частично целочисленного и линейного программирования большой размерности, а также в разработке языковых и системных средств поддержки библиотеки программных модулей, реализующих численные методы и методы генерации задач линейного программирования. П.Э. Шкляром и А.А. Станевичюсом были разработаны два варианта симплекс-метода, а также метод ветвей и границ для решения частично-целочисленных задач. Здесь авторам помог опыт, накопленный во время работ А.А. Станевичюса с известным американским специалистом W.M. Orchard-Hays в Международном институте прикладного системного анализа IIASA.

Позже была разработана интерпретирующая система ЛП/БЭСМ-6 со своим входным языком для управления библиотекой программ-модулей. Она позволила за короткое время испытать и отобрать управляющие параметры программы симплекс-метода, надежность которой возросла многократно при решении прикладных задач. И.В. Мироновой были разработаны входной язык генератора задач и собственно пакет программ генерирования числовых моделей линейного программирования. Эти языковые и программные средства успешно использовались при разработке экономико-математической модели оптимизации перспективного типажа тракторов.

Л.В. Щербак совместно с А.А. Станевичюсом в статье [38] разработали новые варианты методов внутренней точки для решения задач линейного программирования, которые основывались на преобразовании пространств, предложенном Ю.Г. Евтушенко и В.Г. Жаданом.



Защита докторской диссертации В.П. Мазуриком в 1990 г. В первом ряду слева направо сидят В.Р. Хачатуров, В.К. Леонтьев, В.В. Шафранский, Ю.Г. Евтушенко, Ю.И. Журавлев, С.М. Швартин, С.И. Гусев



Группа сотрудников отдела. Слева направо: А.И. Голиков, С. Кетабчи, Ю.Г. Евтушенко, А.Я. Белянков, А.В. Тюленев, С.С. Арсеньев-Образцов, В.Г. Жадан, А.Ф. Албу, Н.В. Мишина, А.А. Станевичюс, А.С. Антипин, Е.С. Засухина (2005 г.)

Были исследованы функции невязок условий оптимальности в итерационных процессах барьерно-ньютоновского метода, доказана сходимость. Установлена особенность функции невязок, заключающаяся в том, что геометрически они представляют собой совокупность усеченных гиперболических параболоидов, зависящих от двух параметров предложенного метода.

С 2002 г. группа сотрудников под руководством А.А. Станевичюса приступила к разработке и реализации параллельных методов решения задач оптимизации большой размерности. Естественно, что в первую очередь был разработан вариант параллельного симплекс-метода для решения задач линейного программирования.

По рекомендации А.А. Дородницына А.А. Станевичюс исполнял обязанности ответственного секретаря редакционной коллегии сборников серии “Алгоритмы и алгоритмические языки” (главным редактором с 1982 г. по 1992 г. был А.А. Самарский). За это время было подготовлено и издано 13 сборников в издательстве “Наука”, огромную работу по технической их подготовке к изданию выполняла М.Н. Кречотень.

В 1992 г. Ю.Г. Евтушенко вместе с В.П. Мазуриком и О.П. Бурдаковым организовали международный журнал “Optimization methods and software”, издаваемый в Великобритании вначале в издательстве “Gordon&Breach”, а позже в издательстве “Taylor&Francis”. Главным редактором журнала был Ю.Г. Евтушенко. За прошедшие годы журнал выпустил 22 тома научных трудов и завоевал мировое признание.

К сожалению, отдел сильно сократился в период, последовавший сразу за развалом СССР. Издательски низкие зарплаты заставили многих сотрудников либо идти в коммерцию, либо уезжать за границу. Особенно пострадали специалисты в области программирования — люди, наиболее востребованные на рынке труда в эти годы. В результате сектор В.П. Мазурика “Прикладные системы для персональных ЭВМ” был закрыт, сектор А.А. Станевичюса “Математическое обеспечение проектирования” значительно сократился. Работа над системой ДИСО была прекращена после закрытия ВНТК “Старт”. Сейчас в отделе однозвенная структура, в коллективе 15 сотрудников.

Коллектив отдела прикладных проблем оптимизации трижды получал гранты Президента РФ “Поддержка молодых ученых и ведущих научных школ”.

Отдел сотрудничает с математическим факультетом Тверского университета, где ведутся совместные работы. Созданные в отделе пакеты программ широко тиражируются и используются во многих организациях нашей страны, они применяются в самых разнообразных областях планирования, проектирования, компьютерной радиотомографии и т. д.

## Литература

1. *Моисеев Н.Н.* Численные методы в теории оптимальных систем. М.: Наука, 1971.
2. *Евтушенко Ю.Г.* Методы решения экстремальных задач и их применение в системах оптимизации. М.: Наука, 1982. 432 с.
3. *Айда-Заде К.Р., Евтушенко Ю.Г.* Быстрое автоматическое дифференцирование на ЭВМ // Математическое моделирование. 1989. Т. 1. С. 121–139.
4. *Евтушенко Ю.Г., Мазурик В.П.* Программное обеспечение систем оптимизации. М.: Знание, 1989.
5. *Evtushenko Y.* Computation of exact gradients in distributed dynamic systems for optimal control problem // Optimization methods and software. 1998. V. 9. P. 45–75.
6. *Грачев Н.И., Евтушенко Ю.Г.* Библиотека программ для решения задач оптимального управления // ЖВМ и МФ. 1979. Т. 19, № 2. С. 367–387.
7. *Грачев Н.И., Фильков А.Н.* Алгоритмические основы оптимизации управляемых систем с разрывной правой частью. М.: ВЦ АН СССР, 1988. 67 с.
8. *Албу А.Ф.* Вычисление градиента в задачах оптимального управления с разрывной правой частью // ЖВМ и МФ. 1995. Т. 35. С. 1058–1066.
9. *Андреева Е.А., Евтушенко Ю.Г.* Численные методы решения задач оптимального управления для систем, описываемых интегро-дифференциальными уравнениями типа Фредгольма // Сборник трудов ВНИИ системных исследований. М., 1989. Вып. 1. С. 4–13.
10. *Грачев Н.И., Евтушенко Ю.Г.* Применение метода сингулярных возмущений для решения минимаксных задач // Доклады Академии наук СССР. 1977. Т. 233, № 3. С. 277–280.
11. *Албу А.Ф., Зубов В.И., Инякин В.А.* Оптимальное управление процессом плавления и кристаллизации вещества // ЖВМ и МФ. 2004. Т. 44, № 8. С. 1364–1379.
12. *Евтушенко Ю.Г., Засухина Е.С., Зубов В.И.* О численном подходе к оптимизации решения задачи Бюргерса с помощью граничных условий // ЖВМ и МФ. 1997. Т. 37, № 12. С. 1449–1458.

13. *Евтушенко Ю.Г., Засухина Е.С., Зубов В.И.* Вычисление вторых производных сложной функции с помощью обобщенной БАД-методологии. М.: ВЦ РАН, 2005. 110 с.
14. *Евтушенко Ю.Г.* Численный метод поиска глобального экстремума функций (перебор на неравномерной сетке) // ЖВМ и МФ. 1971. Т. 11, № 6. С. 1390–1400.
15. *Евтушенко Ю.Г.* Численный метод отыскания наилучших гарантированных оценок // ЖВМ и МФ. 1972. Т. 12, № 1. С. 89–104.
16. *Евтушенко Ю.Г., Потапов М. А.* Методы решения многокритериальных задач // Доклады Академии наук СССР. 1986. Т. 291, № 1. С. 25–39.
17. *Евтушенко Ю.Г., В. А. Раткин В. А.* Метод половинных делений для глобальной оптимизации функции многих переменных. Техническая кибернетика. 1987. Т. 1. С. 119–127.
18. *Евтушенко Ю.Г.* Два численных метода решения задач нелинейного программирования // Доклады Академии наук СССР. 1974. Т. 215, № 1. С. 38–40.
19. *Евтушенко Ю.Г., Жадан В.Г.* Релаксационный метод решения задач нелинейного программирования // ЖВМ и МФ, 1977. Т. 17, № 4. С. 73–78.
20. *Евтушенко Ю.Г., Жадан В.Г.* Барьерно-проективные методы решения задач нелинейного программирования // ЖВМ и МФ. 1994. Т. 34, № 5. С. 669–683.
21. *Evtushenko Yu.G., Zhadan V.G.* The Space Transformation Technique. The State of the Art. // In: Nonlinear Optimization and Applications (Edited by G. Di Pillo and F. Gianessy). 1996. P. 101–123.
22. *Жадан В.Г.* Прямо-двойственный метод Ньютона для задач линейного программирования // ЖВМ и МФ. 1999. Т. 39, № 1. С. 17–32.
23. *Голиков А.И., Евтушенко Ю.Г. Моллаверди Н.* Применения метода Ньютона к решению задач линейного программирования большой размерности // ЖВМ и МФ. 2004. Т. 44, № 9. С. 1484–1493.
24. *Евтушенко Ю.Г., Жадан В.Г.* К вопросу о систематизации численных методов нелинейного программирования. Методы последовательной безусловной минимизации. М.: ВЦ АН СССР, 1988. 64 с.
25. *Евтушенко Ю.Г., Жадан В.Г.* Точные вспомогательные функции в задачах оптимизации // ЖВМ и МФ, 1990. Т. 30, № 1. С. 43–57.
26. *Evtushenko Yu.G., Rubinov A.M., Zhadan V.G.* General Lagrange-type functions in constrained global optimization. Part I: Auxiliary functions and optimality conditions. Part II: Exact auxiliary functions // Optimizations Methods and Software. 2001. V. 16, № 1–4. P. 193–256.
27. *Жадан В.Г.* Метод модифицированной функции Лагранжа для задач многокритериальной оптимизации // ЖВМ и МФ, 1988. Т. 28, № 11. С. 1603–1618.
28. *Голиков А.И., Коткин Г.Г.* Характеристика множества оптимальных оценок задачи многокритериальной оптимизации // ЖВМ и МФ. 1988. Т. 28, № 10. С. 1461–1474.
29. *Голиков А.И., Жадан В.Г.* Итеративные методы решения задач нелинейного программирования с использованием модифицированных функций Лагранжа // ЖВМ и МФ. 1980. Т. 20, № 4. С. 874–888.
30. *Голиков А.И., Евтушенко Ю.Г.* Теоремы об альтернативах и их применение в численных методах // ЖВМ и МФ. 2003. Т. 43, № 3. С. 354–375.
31. *Голиков А.И., Евтушенко Ю.Г., Кетабчи С.* О семействах гиперплоскостей, разделяющих полиэдры // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 2005. Т. 45, № 2. С. 238–253.
32. *Антипин А.С.* О сходимости и оценках скорости сходимости проксимальных методов к неподвижным точкам экстремальных отображений // ЖВМ и МФ, 1995. Т. 35, № 5. С. 688–704.
33. *Антипин А.С.* Равновесное программирование: проксимальные методы // ЖВМ и МФ. 1997. Т. 37, № 11. С. 1327–1339.
34. *Антипин А.С.* Differential equations for equilibrium problems with coupled constraints // Nonlinear Analysis. 2001. V. 47. P. 1833–1844.
35. *Антипин А.С.* Метод внутренней линеаризации для задач равновесного программирования // ЖВМ и МФ. 2000. Т. 40, № 8. P. 1142–1162.
36. *Антипин А.С., Васильев Ф.П.* Методы регуляризации для решения задачи равновесного программирования с неточными входными данными, основанные на расширении множества // ЖВМ и МФ. 2002. Т. 42, № 8. P. 1158–1165.
37. *Антипин А.С.* Extragradient approach to the solution of two person nonzero-sum games // Optimization and Optimal Control. P.M. Pardalos, I. Tsevendorij and R. Enkhbat. Editors. World Scientific Publishing Co. 2003. P. 1–28.
38. *Станевичюс А.А., Щербак Л.В.* Новые варианты барьерно-ньютоновских методов для решения задач линейного программирования // ЖВМ и МФ. 1995. Т. 35, № 12. С. 1796–1807.
39. *Жадан В.Г.* Численные методы линейного и нелинейного программирования. Вспомогательные функции в условной оптимизации. М.: Изд-во ВЦ РАН, 2002. 160 с.

**ОТДЕЛ МАТЕМАТИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ РАСПОЗНАВАНИЯ  
И МЕТОДОВ КОМБИНАТОРНОГО АНАЛИЗА.  
ОТДЕЛ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МЕТОДОВ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ**

*Ю.И. Журавлев, К.В. Рудаков*

---

**И.** Отделы формировались на базе лаборатории проблем распознавания, созданной в ВЦ АН СССР в ноябре 1969 г. по инициативе академика А.А. Дородницына и члена-корреспондента АН СССР Н.Н. Моисеева. Заведующим лабораторией был избран по конкурсу доктор физ.-матем. наук, профессор Ю.И. Журавлев. В состав лаборатории вошла группа кандидата наук В.Б. Кудрявцева (в настоящее время В.Б. Кудрявцев — доктор физ.-матем. наук, профессор, заведующий кафедрой на механико-математическом факультете МГУ им. М.В. Ломоносова). В группе работали З.Е. Королева, в дальнейшем канд. физ.-матем. наук, Л.В. Бирюкова, позднее канд. физ.-матем. наук, и Е.В. Перина, в замужестве Дюкова. Елена Всеволодовна последовательно защитила кандидатскую и докторскую диссертации по физико-математическим наукам; в настоящее время она — ведущий научный сотрудник отдела вычислительных методов и прогнозирования. В штат лаборатории был также зачислен С.М. Швартин, канд. физ.-матем. наук, участник Великой Отечественной войны, кавалер боевых орденов и медалей. Большую роль в работах лаборатории играли аспиранты и стажеры из республик Средней Азии, Закавказья, Белоруссии, а также из дружественных ГДР, Польши, Кубы, Вьетнама. За 36 лет своего существования лаборатория и организованные на ее базе отделы подготовили для перечисленных стран и республик 11 докторов и более 30 кандидатов наук. О некоторых из них позднее будет дана более подробная информация.

В первые годы лаборатория вела исследования модификаций тестового алгоритма распознавания, описанного Ю.И. Журавлевым в 1964 г. и показавшего хорошие результаты при прогнозировании редких событий. Алгоритм применялся для прогнозирования месторождений полезных ископаемых, в демографических и социологических прогнозах, медицинской диагностике (Ю.И. Журавлев, В.Б. Кудрявцев, З.Е. Королева).

Позднее на базе этих исследований было сформировано научное направление — изучение тестов бинарных и конечнозначных таблиц, а также других типов “разделителей частей” таких таблиц. Пионерские работы в этом направлении были выполнены Ю.И. Журавлевым. Фундаментальные результаты получены многими советскими и зарубежными учеными. В их числе — исследования Е.В. Дюковой и ее учеников.

В первые годы существования лаборатории Ю.И. Журавлев формирует и исследует получившее в дальнейшем широкую известность семейство алгоритмов вычисления оценок (голосования) для задач распознавания и классификации. Впервые в научной литературе было описано многопараметрическое множество алгоритмов, включающее в себя все известные тогда эвристические и статические алгоритмы. Алгоритм выделялся заданием системы опорных множеств — совокупностей признаков, по которым происходит сравнение эталонного и распознаваемого объекта, параметров, определяющих вычисление функции близости весов признаков, описывающих объекты, весов эталонных объектов, величин поощрений и штрафов, порогов решающего правила. Был развит аппарат для построения эффективных формул вычисления оценок — величин, по которым принимается окончательное решение о занесении объекта в один или несколько классов. Были также намечены подходы к построению в рамках модели алгоритмов, оптимальных по точности на заданном множестве объектов.

Исследованию алгоритмов вычисления оценок посвящено большое число публикаций в советской, российской и зарубежной литературе. Это направление послужило основой большого числа прикладных работ. Для реализации тестовых алгоритмов и алгоритмов голосования были созданы пакеты прикладных программ и решено большое число прикладных задач. В те годы новые научные результаты достаточно активно внедрялись в различных отраслях народного

хозяйства. За эти работы Ю.И. Журавлев и П.П. Кольцов (в настоящее время заместитель директора Института системных исследований РАН) получили премию Совета Министров СССР.

Несколько позднее Ю.И. Журавлевым были созданы основы алгебраической теории алгоритмов (1976–1979 гг.). Им было замечено, что для многих задач, в том числе распознавания, классификации, прогнозирования по эталонным траекториям, любой алгоритм — эвристический, приближенный и т. д. — за исключением несущественной финальной части может быть представляем как отображение исходной информации на числовой вектор фиксированной для данного класса задач длины. Тогда оказалось возможным складывать, умножать алгоритмы и умножать их на скаляры, проделывая эти операции над финальными векторами. Таким образом, множество алгоритмов погружается в линейное замыкание или алгебраическое замыкание — формируется совокупность полиномов над алгоритмами. Это выражения вида

$$\sum c_{i_1 \dots i_k} A_{i_1} A_{i_2} \dots A_{i_k},$$

где  $c_{i_1} \dots c_{i_k}$  — константы,  $A_{i_j}$  — отображения исходной информации на числовые векторы. Оказалось, что алгоритмы-полиномы обладают сильными корректирующими свойствами. Даже если все базовые алгоритмы делают ошибки на заданном контрольном множестве задач, то при выполнении просто проверяемых и, как правило, имеющих место условиях может быть в явном виде построен полином, не допускающий на этом множестве ни одной ошибки.

Алгоритмы-полиномы устойчивы, из чего следует сходимость по вероятности на “почти всем” множестве задач, если это множество удовлетворяет гипотезе компактности.

Описанные выше результаты были получены Ю.И. Журавлевым и продолжены и развиты его учениками. Наиболее яркие результаты получили член-корреспондент РАН, академик Российской академии образования профессор В.Л. Матросов (в настоящее время ректор МГПУ) и член-корреспондент РАН профессор К.В. Рудаков. Позднее фундаментальные результаты по алгебраической теории алгоритмов были получены их учениками и учениками Ю.И. Журавлева, среди которых можно выделить сотрудников отделов К.В. Воронцова, А.Г. Дьяконова, Ю.В. Чеховича.

В рамках теории алгоритмов вычисления оценок и алгебраической теории алгоритмов были выполнены фундаментальные работы и защищены докторские диссертации учеными ближнего и дальнего зарубежья. Вот лишь некоторые из них:

М. Айдарханов — доктор, профессор, директор Института проблем информатики и управления, Казахстан;

А. Дюсембаев — доктор, профессор Казахского национального университета;

А. Мухамедгалиев — доктор, профессор, вице-президент АО Казгеокосмос, Казахстан;

А. Кабулов — доктор, профессор, Узбекистан;

А. Алексанян — доктор, профессор, зав. кафедрой Ереванского университета;

Бак-хын-Кханг — доктор, профессор, директор Института, Вьетнам;

Х.Р. Шульклопер — доктор, профессор, Куба.

Большое значение для развития лаборатории имела организованная на ее базе в 1971 г. по инициативе академика А.А. Дородницына международная конференция по практическим применениям распознавания образов. На ней впервые была поставлена под сомнение монополия статистических методов распознавания как якобы точных и обоснованных, в отличие от эвристических.

В дискуссии на эту тему было убедительно показано, что условия, при которых статистические методы действительно обоснованы, практически выполняются крайне редко. Поэтому при решении прикладных задач они не имеют никаких преимуществ перед эвристическими. Последние в силу большей вариабельности, как правило, лучше “подстраиваются” под класс задач и часто дают существенно большую точность. Вторым мифом, впервые подвергнутому сомнению именно на этой конференции, было широко распространенное мнение, что известная теорема Вапника–Червоненкиса о равномерной сходимости по вероятности распознающих алгоритмов якобы запрещает использование “больших” моделей распознающих алгоритмов. Полученный с помощью оптимизации точности на обучающем (или контрольном) массиве алгоритм из такой модели по Вапнику–Червоненкису не гарантирует приемлемой точности на



распознавании новых объектов. Этот вывод, абсолютно правильный в рамках статистического формализма, плохо согласуется с реальностью. Предполагается, что за пределами обучающей (или контрольной) выборки могут осуществиться все возможные продолжения. В реальной жизни это не так. За редчайшими исключениями реализуется лишь малая доля возможных продолжений. Отсюда следует (и это подтверждено решением большого числа прикладных задач) возможность использования моделей большой емкости.

Контакты, установленные на конференции с зарубежными учеными, привели к интенсификации международных связей лаборатории. Под эгидой комиссии “Научные вопросы вычислительной техники” академиями наук социалистических стран организуются рабочие группы по распознаванию образов, которыми руководит Ю.И. Журавлев. Сотрудники лаборатории активно работают в Международном математическом центре им. С. Банаха (Варшава), с университетами Ростова, Берлина, Йены, Лейпцига, академиями наук социалистических стран, читают лекции во Франции, Югославии, Скандинавских странах.

В 1970 г. в лабораторию приходит В.К. Леонтьев, он становится центром кристаллизации исследований по дискретному анализу в Вычислительном центре АН СССР. Позднее на основе работ В.К. Леонтьева и его учеников создается оригинальная школа в рамках дискретной математики. Организационно она оформляется в сектор комбинаторного анализа в составе отдела проблем распознавания и методов комбинаторного анализа.

В том же году Ю.И. Журавлев становится профессором МФТИ. Его лекции привлекают талантливых студентов, которые затем становятся аспирантами, а потом — сотрудниками ВЦ АН СССР. Среди “первого набора” выделяется К.В. Рудаков, который еще студентом выполнил яркую научную работу, а затем, проводя исследования в рамках алгебраической теории алгоритмов, получил выдающиеся результаты, был удостоен премии Ленинского комсомола, стал доктором наук, членом-корреспондентом АН СССР (1997). К этому времени у него появились талантливые ученики, оформились и были существенно развиты новые оригинальные направления научных исследований. Поэтому в 1997 г. в ВЦ РАН был создан новый отдел — вычислительных методов распознавания. Его заведующим стал К.В. Рудаков.

Второе важное направление исследований осуществляется в секторе распознавания и цифровой обработки речевых сигналов (до 1987 г. — сектор автоматического распознавания речи).

Этот сектор был образован в Вычислительном центре АН СССР в 1978 г. Его основателем и руководителем был один из пионеров исследований в области речевых технологий в Советском Союзе Валериан Николаевич Трунин–Донской.

В.Н. Трунин–Донской (03.03.35 г. – 15.12.87 г.) пришел работать в ВЦ АН СССР в 1959 г. на должность инженера по обслуживанию ЭВМ, в том же году он закончил Московский энергетический институт.

В начале 60-х гг. в Институте проблем информации (ИППИ АН СССР), в группе под руководством Г.И. Цемеля начались исследования по проблеме распознавания речи. Сотрудники ИППИ располагали значительным опытом анализа и выделения информативных признаков из речевого сигнала на основе аналоговых устройств. Эта тематика заинтересовала В.Н. Трунина–Донского.

Началом работ по автоматическому распознаванию речи в ВЦ АН СССР можно считать проведение совместных с сотрудниками ИППИ исследований, которые носили очень плодотворный характер и привели к долговременному сотрудничеству и дружеским отношениям, которые существуют между коллективами и поныне.

ВЦ АН СССР тогда располагал очень мощной, по тем временам, вычислительной техникой, которой не было в ИППИ. Заслугой В.Н. Трунина–Донского было предложение использовать ЭВМ для автоматического анализа параметров, полученных на основе аналоговых устройств выделения признаков с последующим автоматическим распознаванием речевых команд (то, что впоследствии назвали аппаратно-программным подходом).

Первая советская система автоматического распознавания цифр, которая работала с голосом произвольного диктора была продемонстрирована В.Н. Труниным–Донским в ВЦ АН СССР в 1964 г. (это была одна из первых систем распознавания речи в СССР — до этого была известна только система речевого управления автоматической тележкой, созданная в Институте систем управления АН Грузинской ССР).

В 60-е гг. у В.Н. Трунина–Донского и у тех, кто с ним работал, сложилась идеология создания так называемых неадаптивных систем распознавания речи, которые не требовали предварительной процедуры настройки на голос диктора, что долгое время отличало работы ВЦ АН СССР от других. В то время общепринятый подход к распознаванию речевых команд опирался на вычисление меры сходства речевых образов методами динамического программирования, что подразумевало наличие режима предварительного обучения на голос конкретного диктора.

В конце 60-х гг. в ВЦ АН СССР совместно с ИППИ АН СССР были созданы первые неадаптивные системы дискретного (пословного) распознавания предложений и систем речевого управления, которые работали без подстройки под голос диктора.

В 1969 г. В.Н. Трунин–Донской защитил кандидатскую диссертацию по проблеме распознавания речи и с этого момента помимо напряженной научно-исследовательской работы проводил большую педагогическую деятельность по отбору и подготовке высококвалифицированных кадров в области автоматического распознавания речи. В течение полутора десятилетий под его руководством было защищено 14 кандидатских и одна докторская диссертация.

Успешная работа по распознаванию речи предполагала наличие знаний не только в области точных наук, но и существенных сведений из фонетики, физиологии и прикладной лингвистики. В.Н. Трунин–Донской вполне соответствовал этим требованиям и отличался энциклопедичностью и широтой взглядов, успешно совмещал точные методы и алгоритмы с “натурально-философским” подходом и эвристиками, основанными на глубоком знании предмета.

В.Н. Трунин–Донской убедил директора ВЦ академика А.А. Дородницына поддержать работы по распознаванию речи в институте. Первоначально группа входила в состав лаборатории технической кибернетики (зав. лабораторией к.т.н. Ю.И. Торгов), затем перешла в лабораторию распознавания образов (заведующий лабораторией д.ф.-м.н. Ю.И. Журавлев). В 1978 г. был создан сектор автоматического распознавания речи. В это время были получены, возможно, наиболее существенные практические результаты за годы существования сектора: созданы аппаратные устройства для выделения информативных признаков (в качестве которых использовались частоты и интенсивности энергии в формантных областях, частота основного тона, параметры клиппированной речи) речевого сигнала, разработаны эвристические алгоритмы для анализа временных последовательностей признаков (то, что сейчас называется сегментными и суперсегментными моделями) и методы распознавания слов словаря на основе распознавания слогов и морфем.

С самого начала работы рядом с В.Н. Труниным–Донским работали талантливые и интересные люди. Кандидаты техн. наук Г.Я. Высоцкий и Б.Н. Рудный принимали активное участие в создании методов неадаптивного распознавания речи и разработке первых отечественных систем распознавания речи.

Под руководством М.В. Кулагина делались УВРП — устройства выделения речевых признаков. А.А. Кольцова исследовала возможность создания специализированных речевых баз данных на основе существовавших в то время в ВЦ АН СССР разработок СУБД. Значительную помощь в практической реализации систем распознавания речи оказали З.А. Вадова, Р.С. Иванова, П. Козадаев, Г.Г. Родионова и другие.

Д.ф.-м.н. А.С. Тангян одним из первых начал исследования по музыкальной кибернетике и моделированию исполнительского мастерства.

Значительная часть новых и интересных результатов была получена аспирантами сектора, которые фактически являлись сотрудниками и выполняли значительный объем научно-исследовательской работы.

Н.В. Сомин разработал один из первых в мире программных комплексов для цифрового моделирования устройств выделения речевых признаков. Н.А. Григорян, В.С. Пятков и Н.К. Обжелян работали над методами анализа речевых сигналов и созданием УВРП — устройств выделения речевых признаков, В.Н. Туркин предложил вычислительно эффективную и надежную модификацию метода динамического программирования для распознавания речи и использовал этот подход (совместно с А.С. Петровым, на предприятии “Россия”) для создания миниатюрной одноплатной системы распознавания речевых команд — эта система была одной из лучших в Советском Союзе. В.Н. Мазур исследовал методы автоматической кластеризации

голосов дикторов, Ф. Коркмазский разработал систему распознавания речи, которая использовала параметры, вычисленные на основе преобразования Уолша. А.Л. Пажитнов, до того как стать создателем компьютерной игры Тетрис, исследовал методы семантико-синтаксического анализа для построения систем понимания речи. Интересные результаты были получены Э.Б. и Н.Б. Донбаевыми, П.В. Миюсовым, Нгуен Ань Туаном, Рей Мейлерес Хосе Роке и Серхио Суаресом. В.Я. Чучупал продолжил новое для сектора направление работ по цифровой обработке сигналов, связанное с повышением качества и разборчивости речи при наличии сильных аддитивных помех и искажений.

Коллектив сектора вел успешную международную научную деятельность. Совместные проекты по исследованию методов анализа речи выполнялись с Институтом современных (постановочных) проблем техники ПАН (В.Н. Трунин–Донской, В.Я. Чучупал), по разработке одноплатных устройств выделения речевых признаков — с Институтом фундаментальных проблем техники АН Кубы (М.В. Кулагин, А.Л. Пажитнов, В.Я. Чучупал), по созданию автоматических методов анализа голосов новорожденных детей для выявления врожденных заболеваний — с Техническим университетом г. Дрездена и университетской клиникой Шаритэ (В.Я. Чучупал), также проводились совместные работы с институтом математики Монгольской академии наук (М.В. Кулагин, А.Л. Пажитнов), Вьетнамской академией наук — д.т.н. Нгуен Ань Туан под руководством В.Н. Трунина-Донского подготовил и защитил в ВЦ АН СССР кандидатскую и докторскую диссертации по проблемам распознавания и синтеза тональной (вьетнамской) речи.

**II.** В 1985 г. на базе лаборатории проблем распознавания был образован отдел проблем распознавания и методов комбинаторного анализа в составе четырех секторов.

В 2005 г. отдел состоит из секторов: математических проблем распознавания, распознавания ситуаций, методов комбинаторного анализа и распознавания и цифровой обработки речевых сигналов. Работы первых двух секторов имеют много общего. Поэтому в дальнейшем описание работ этих секторов не всегда разделено.

Продолжалось исследование алгоритмов типа вычисления оценок и алгебраической теории алгоритмов. Для логических алгоритмов, основанных на разделении классов с помощью дизъюнктивных нормальных форм, был построен полиномиальный по сложности алгоритм подсчета ошибок при скользящем контроле (Ю.И. Журавлев). Получена неулучшаемая оценка степени корректного алгоритма-полинома в алгебраическом замыкании алгоритмов вычисления оценок.

Если контрольный массив содержит  $q$  объектов и рассматривается задача распознавания с  $l$  классами, то степень полинома-алгоритма не превосходит

$$[\log_2 q] + [\log_2 l].$$

Последний результат был получен А.Г. Дьяконовым.

### **Сектор распознавания ситуаций**

Сектор распознавания ситуаций был создан в апреле 1988 г. для разработки практических алгоритмов и программных систем распознавания, классификации и прогноза. Основные результаты связаны с развитием логических моделей распознавания на случаи разнотипных данных, применением в логических подходах идей статистического анализа и моделирования, разработкой методов синтеза оптимальных решений задачи кластерного анализа (таксономии, “обучения без учителя”) коллективами алгоритмов, созданием методов решения специализированных оптимизационных задач при машинном обучении, разработкой пакетов прикладных программ общего и специального назначения (программные средства ОБРАЗ, ДИСАРО, ЛОРЕГ, ПАЛМОДА). Данные разработки являются фактически системами автоматизации проектирования высокоточных алгоритмов распознавания и прогноза. Система ЛОРЕГ (в составе SoLo) была удостоена Золотой медали с отличием на Всемирном Салоне изобретений “Эврика-96” (Брюссель, ноябрь 1996 г.). Новейшей разработкой является “Универсальная программная система интеллектуального анализа данных, распознавания и прогноза “РАСПОЗНАВАНИЕ”, в которой объединены все основные отечественные и зарубежные подходы для решения задач распознавания, классификации и прогноза по выборкам прецедентов. Система позволяет (с высоким уровнем автоматизации) решать данные задачи множествами алгоритмов в условиях неполноты и частичной противоречивости данных. В марте 2005 г. она представлялась на выставке ЦеБИТ-2005, ее развитие поддерживается Европейским сообществом в виде специального гранта.

Эффективность алгоритмов и систем подтверждена многочисленными применениями в медицине, технике, геологии, социологии, политике, химии, сельском хозяйстве. Многие прикладные работы выполнены по договорам с научными и производственными организациями. Примерами данных исследований являются разработки по автоматическому распознаванию солеотложений в нефтедобывающем оборудовании в интересах ПО «ЮГАНСКНЕФТЕГАЗ» и малых локализаций нефти в нефтеносных пластах, методы распознавания рукописных цифр при обработке банковских документов, распознавание типов движущихся объектов по комплексу акустических и сейсмических сигналов при создании систем обнаружения. Результативные совместные исследования проводились в области обработки и анализа биомедицинских данных с институтами РАН и РАМН. В содружестве с Онкоцентром РАМН и Институтом биохимической физики РАН проведены исследования по влиянию разнообразных клинических и лабораторных показателей на результаты лечения онкологических больных и построены соответствующие прогностические алгоритмы. Совместно с Научным центром эндокринологии РАМН разработан метод прогнозирования рецидивов у больных эутиреоидным зобом, в сотрудничестве с Институтом биохимической физики РАН и Институтом неврологии РАМН были проведены исследования по прогнозу динамики посттравматической депрессии и диагностики типа инсульта (ишемический или гемаррогический), с Институтом ревматологии РАМН были проведены исследования по прогнозу результатов лечения ревматоидного артрита в зависимости от характеристик курса лечения. В перечисленных работах активно участвовал Ю.И. Журавлев и сотрудница сектора методов комбинаторного анализа канд. физ.-матем. наук Н.Н. Катериночкина. Сотрудники секторов распознавания ситуаций и математических методов распознавания и прогнозирования участвовали в выполнении 14 грантов РФФИ, проекта ФЦП «Интеграция» — Учебно-научный центр «Информатика. Распознавание образов. Анализ изображений. Интеллектуальные информационные технологии», программ фундаментальных исследований Президиума РАН № 16, 17 и Программы «ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ НАУКИ — МЕДИЦИНЕ», проектов Минпромнауки, семи грантов ИНТАС, программ отделения математических наук РАН.

Следует отметить также следующие результаты сотрудников сектора распознавания ситуаций. Разработан общий метод для решения задач оптимизации моделей распознавания, созданы методы поиска логических закономерностей по прецедентам, построен аналог алгебраического подхода для решения задач кластерного анализа (В.В. Рязанов). Отметим также, что В.В. Рязанов является руководителем и соавтором создания программных систем для решения задач анализа данных и прогнозирования.

Построен класс дискретных метрик на группе подстановок, которые могут использоваться в задачах многомерного ранжирования и рангового кодирования. На этой основе разработан алгоритм, позволяющий строить разбиение произвольной выборки в систему статистически эквивалентных блоков (А.П. Виноградов). Разработаны средства повышения точности прогнозирования через повышение устойчивости процессов обучения. Предложены новые методы распознавания, использующие коллективные решения по системам разнотипных закономерностей. Созданы новые статистически обоснованные процедуры взвешенного голосования по системам базовых подобластей признакового пространства. Разработаны новые методы анализа данных, основанные на поиске оптимальных систем статистически верифицированных закономерностей в признаковом пространстве (О.В. Сенько).

Разработан метод выделения максимальной совместной подсистемы системы линейных неравенств, эффективной для класса систем небольшого ранга с большим числом неравенств. В общем случае предложен приближенный алгоритм, позволяющий существенно расширить множество задач, решаемых в реальное время (Н.Н. Катериночкина).

В 1996 г. по инициативе ректора МГУ академика В.А. Садовниченко была организована кафедра «Математические методы прогнозирования». Ее заведующим стал Ю.И. Журавлев, на кафедре работает и В.В. Рязанов. Кроме того, и Ю.И. Журавлев, и В.В. Рязанов являются профессорами МФТИ. Поэтому в секторах активно работают студенты и аспиранты МФТИ и МГУ. Среди полученных ими результатов можно отметить следующие. Предложен новый оптимизационный подход и практические методы для решения кластерного анализа большой размерности (А.С. Бирюков). Разработана концепция выпуклого стабилизатора, предназначенного для построения эффективных и устойчивых коллективных решений при решении задачи

распознавания, разработан новый способ регуляризации некорректно поставленных задач распознавания образов (Д.П. Ветров), найдена индуктивная процедура построения корректного алгоритма для задач распознавания, позволяющая использовать построенный к текущему шагу алгоритм при пополнении информации новыми объектами, и проведены исследования структуры алгоритмов вычисления оценок (А.А. Докукин), процедуры адаптивной коррекции для механизма генерации базы знаний в нечетких экспертных системах (Д.А. Кропотов).

Описаны системы опорных множеств, при которых максимально эффективно вычисляются оценки в алгоритмах голосования, разработаны нетрудоёмкие методы построения дизъюнктивной нормальной формы (д.н.ф.) для функций с малым числом нулей (А.Г. Дьяконов).

### Сектор комбинаторного анализа

Сектор комбинаторного анализа основан в 1985 г. при создании на базе лаборатории проблем распознавания отдела проблем распознавания и методов комбинаторного анализа. Бессменным руководителем отдела является доктор физ.-матем. наук профессор В.К. Леонтьев, один из ведущих в России специалистов в области дискретной математики. Тематика работ сектора весьма разнообразна, особенно выделяется направление, связанное с классификацией, поиском, защитой и анализом информации.

Основные результаты, полученные сотрудниками сектора, опубликованы в ведущих российских и международных научных журналах. Сотрудники сектора неоднократно участвовали в организации и проведении международных конференций, участвовали в программах международного обмена, проходивших в США, Германии, Польше, Венгрии, Кубе и других странах.

Основные полученные результаты: найдены новые границы в задачах о покрытии, решена проблема совершенных кодов, построены оптимальные коды, обнаруживающие ошибки, введена словарная модель и изучена проблема восстановления слов по фрагментам, найдены условия гамильтоновости торической решетки. В теории задач дискретной оптимизации построена теория устойчивости решений и табулирования в дискретных экстремальных задачах на базе понятия “радиус устойчивости”. Получены результаты о приближенных методах решения систем булева полинома с логарифмически ограниченным числом мономов, найдено распределение числа корней случайных полиномов над конечным полем, лежащих в поле коэффициентов (В.К. Леонтьев).

Получена асимптотика логарифма числа пороговых булевых функций, сделаны существенные продвижения в решении проблемы самообучения процедур взвешенного голосования (Ю.А. Зувев).

Сделано существенное продвижение в описании структуры многогранников комбинаторной оптимизации. На основе этих результатов созданы эвристические алгоритмы для решения задач дискретной оптимизации. В области теории сложности изучены проблемы полноты в классах перечислительной сложности (полнота сравнения числа нулей и единиц многочлена Жегалкина степени 3; полнота оценивания весовой функции кода в отдельных точках единичной окружности). Эти результаты дают, с одной стороны, верхние оценки на возможности квантовых моделей вычисления, а с другой стороны, показывают возможность применения результатов квантовой теории сложности для анализа вычислительной сложности классических классов сложности (М.Н. Вялый).

Найдена в шенноновской постановке трудоёмкость построения максимального верхнего нуля монотонной булевой функции.

Если  $n$  — число переменных, то максимальное число обращений к оракулу при поиске равно:

$$C_n^{\lfloor n/2 \rfloor} + 1.$$

Построены оптимальные алгоритмы поиска максимального верхнего нуля для различных классов булевых функций и функций  $k$ -значной логики.

Исследованы некоторые классы дискретных экстремальных задач, связанных с частичной расшифровкой монотонных булевых функций. Разработаны методы их решения, допускающие эффективную реализацию для задач большей размерности.

В частности, для задачи булева программирования с неотрицательными коэффициентами линейного функционала и линейных ограничителей (“многомерный рюкзак”) разработан ряд

приближенных алгоритмов типа локального поиска, отличающихся высоким быстродействием (Н.Н. Катериночкина).

Получена асимптотика функции Шеннона для сложности схем ограниченной ширины. Для неповторных П-схем получена точная формула длины полного проверяющего теста, найден порядок логарифма функции Шеннона для полного диагностирующего теста в случае неповторных схем. Для произвольных симметрических булевых функций построен диагностирующий тест длины, линейной от числа переменных. Сконструирован минимальный проверяющий тест для квазибесповторных П-схем. Введена естественная мера контролируемости схемы и получена нижняя граница этой величины для почти всех булевых функций. Сконструированы асимптотически оптимальные методы синтеза вентильных систем для класса не всюду определенных булевых  $k$ -значных матриц, синтеза  $(i, k)$ -полюсника, реализующего попарно-ортогональные не всюду определенные булевы функции (Х.А. Мадатян).

Изучена проблема отделимости суперинтуиционистских пропозициональных логик. Для достаточно широкого класса таких логик доказана их отделимость. Разработан новый метод представления конечных псевдобулевых алгебр через частично упорядоченные множества. Метод успешно применен к исследованию суперинтуиционистских пропозициональных логик дедуктивного характера. Получены критерии изоморфной вложимости конечных псевдобулевых алгебр и их обобщений. Исследованы свойства простой подстановки для неклассических логик (В.И. Хомич).

Важные результаты в области дискретного анализа получены сотрудниками других секторов. Так, построены точные или асимптотически точные методы минимизации булевых функций с малым числом нулей (Ю.И. Журавлев, А.Ю. Коган, А.Г. Дьяконов).

Показано, что локальные алгоритмы вычисления информации образуют в некотором смысле “предполный класс” в множестве всех алгоритмов — любое существенное расширение этого класса приводит к построению всех алгоритмов (Г.Ф. Лосев). Показано, что теорема Ю.И. Журавлева о сложности построения минимальной д.н.ф. в классе локальных алгоритмов верна не только в случае “цикл – цепь”, но и для широкого класса функций, не имеющих ядровых интервалов и таких, что их максимальные интервалы имеют одинаковую размерность (А.В. Богданов).

Сотрудники сектора выполняют исследования по грантам РФФИ, в рамках программ фундаментальных исследований Отделения математических наук РАН.

Многие из них ведут активную преподавательскую работу, участвуют в подготовке аспирантов и докторантов. Так, В.К. Леонтьев является профессором МГУ и МФТИ. Им подготовлено 16 кандидатов наук. Среди его учеников 2 доктора наук. В.И. Хомич преподает в МВТУ им. Н.Э. Баумана, М.Н. Вялый — в МФТИ и НМУ (Независимом Московском университете), Ю.А. Зуев — профессор Московского государственного университета технологий и управления.

### **Сектор распознавания и цифровой обработки речевых сигналов**

С 1987 г. сектором руководит Владимир Яковлевич Чучупал, ученик В.Н. Трунина–Донского. В.Я. Чучупал закончил математический факультет МГПИ им. В.И. Ленина в 1976 г., в 1980 г. поступил в аспирантуру ВЦ АН СССР. Его научным руководителем был В.Н. Трунин–Донской. Основной темой исследований В.Я. Чучупала были методы, в частности интерактивные, обработки и анализа речи, которая наблюдается в условиях очень сильных помех и искажений. В 1984 г. В.Я. Чучупал закончил аспирантуру, стал сотрудником ВЦ РАН и защитил кандидатскую диссертацию.

Основными направлениями исследований коллектива сектора в настоящее время являются:

- исследование методов моделирования, цифровой обработки и распознавания речи;
- разработка инструментальных средств и ресурсов для создания интерактивных систем анализа, распознавания и цифровой обработки речевых сигналов,
- разработка алгоритмов и программ для цифровой обработки (сжатие, фильтрация) и распознавания речи и дикторов.

Большая часть исследований выполняется в соответствии с научными грантами Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ), которые сотрудники сектора регулярно получают с 1994 г. — года начала деятельности Фонда. Часть исследований выполняется в рамках НИР, заказчиками которых являются различные государственные структуры.

Наиболее интересные исследования, выполненные в последнее время, связаны с разработкой методов акустико-фонетического моделирования и распознавания речевых сигналов, которые сохраняют работоспособность в естественных условиях речевых коммуникаций, а именно при наличии различных каналов передачи информации, шумов, неречевых акустических событий, а также variability голосов.

В основу методов моделирования речевого потока при примененном в ВЦ РАН подходе положены так называемые множественные модели звуков и звукосочетаний, методы построения которых были предложены и исследованы сотрудниками сектора в ходе выполнения грантов РФФИ на рубеже веков.

Идея множественных моделей достаточно проста и состоит в том, что для звука создаются, вообще говоря, несколько различных специализированных акустических моделей, которые затем параллельно используются в лексической сети при декодировании речевого потока. Выбор таких множественных моделей осуществляется автоматически, на основе анализа речевого корпуса данных, с помощью построения бинарных решающих деревьев.

Использование множественных моделей предоставляет реальный путь построения систем распознавания речи, обладающих значительным иммунитетом к наличию шумов, изменению характеристик голоса, канала связи и акустико-фоновой обстановки.

К настоящему времени основные сотрудники, начинавшие свой путь вместе с В.Н. Труниным-Донским, ушли на пенсию. Их работу продолжает новое поколение.

В составе сектора работают специалисты по прикладной математике, математическому и системному программированию. Ими проводятся как теоретические, так и экспериментальные исследования речевых сигналов, создаются интерактивные системы и проблемно ориентированные комплексы программ в области телекоммуникации и цифровой обработки речевых сигналов.

К.А. Маковкин занимается исследованием сегментных моделей для распознавания речи и применения аппарата нейронных сетей для акустико-фонетического моделирования речи, а также реализацией прикладных инновационных проектов по распознаванию речи и дикторов, к.ф.-м.н. С.В. Андреев разработал интерактивную систему для визуализации и отображения параметров речевых сигналов. А.В. Чичагов разработал теоретическую многофакторную модель речевого сигнала, которая была использована, в частности, для решения задач фильтрации речевого сигнала. В.П. Кальян ведет работы по музыкальной кибернетике.

Как и в прежние годы коллектив сектора продолжает активное международное сотрудничество, которое, впрочем, существенно отличается от прежнего как по географии, так и по тематике выполняемых проектов.

Так, в период с 1994 г. по 2000 г. сотрудниками сектора был разработан ряд программных продуктов, таких как пакет для интерактивной фильтрации сигналов, программный комплекс для отображения сонограммы и основного тона в реальном масштабе времени для компьютеризированной речевой лаборатории CSL4300, обучающие артикуляционные игры для детей — Voice Games для аппаратного комплекса Visi-Pitch фирмы KAY Elemetrics Corporation (США) — мирового лидера в области медицинской аппаратуры для акустических измерений.

В 1996–2001 гг. сотрудники сектора выполнили серию контрактов с исследовательским подразделением канадской фирмы Nortel Networks Corp. (крупнейшим мировым производителем телекоммуникационного оборудования) — Toronto Multimedia Laboratory, посвященных разработке и сопровождению программного обеспечения для цифровой обработки речевых и специальных аудиосигналов (полосные вокодеры, передача сигнала и данных в стандартах V29, V27, V17, распознавание сигналов в телефонной линии).

Исследования и разработка системы верификации и идентификации личности по голосу для реализации биометрического контроля за доступом были проведены в 2004 г. в интересах исследовательского центра фирмы Samsung (Южная Корея).

### **Отдел вычислительных методов прогнозирования**

Отдел вычислительных методов прогнозирования был создан в 1997 г. на базе отдела проблем распознавания и методов комбинаторного анализа. Бессменным заведующим отдела является член-корреспондент РАН, профессор Константин Владимирович Рудаков. Отдел состоит из двух секторов: сектор проблем информационного моделирования и сектор математического моделирования в экологии и медицине.

### **Сектор проблем информационного моделирования**

Основным направлением теоретических исследований является алгебраическая теория алгоритмов. В этом направлении К.В. Рудаковым и его учениками получен ряд фундаментальных результатов. Им предложена и обоснована формализация понятия дополнительной к прецедентной информации в задачах классификации в виде специальных категорий. На этой основе им разработан математический аппарат для регулярного исследования моделей алгоритмов и семейств корректирующих операций и получен ряд окончательных результатов о регулярности, полноте и сложности для основных моделей алгоритмов и их подмоделей, а также для классических полиномиальных семейств корректирующих операций. В последние годы проводятся исследования новых классов задач распознавания и прогнозирования и изучаются свойства и способы синтеза проблемно-ориентированных метрик для этих задач.

Разработаны оптимизационные методы решения задач распознавания и восстановления регрессии, основанные на алгебраическом подходе. Оценена экстраполирующая способность обучаемых алгоритмов, построено невероятностное (комбинаторное) обобщение теории восстановления зависимостей Вапника-Червоненкиса (К.В. Воронцов).

Изучены задачи построения обучаемых алгоритмов классификации точечных массовых данных. Исследована полнота и разрешимость семейств алгоритмов в задачах с теоретико-множественными ограничениями (Ю.В. Чехович).

Разработано и теоретически обосновано обобщенное понятие непрерывного скелета дискретного изображения, инвариантного к различным способам непрерывной аппроксимации границы дискретного объекта (И.А. Рейер).

Разработаны методы комбинаторного (логического) анализа данных в задачах распознавания и применения этих методов для синтеза распознающих алгоритмов. Предложены и исследованы методы поиска информативных фрагментов в исходных признаковых описаниях обучающих объектов, базирующиеся на асимптотически оптимальных алгоритмах построения тупиковых покрытий булевых и целочисленных матриц (Е.В. Дюкова).

Разработан подход к повышению эффективности (в смысле точности распознавания) дискретных процедур распознавания, основанный на выделении в обучающей выборке типичных для своих классов объектов и объектов, лежащих на границе между классами. Построены модели распознающих процедур, основанные на поиске  $\sigma$ -покрытий матрицы, составленной из описаний обучающих объектов. Получен ряд оценок, касающихся метрических (количественных) свойств множества  $\sigma$ -покрытий целочисленной матрицы (Н.В. Песков).

Работы сотрудников сектора поддержаны грантами РФФИ, сектор выполняет работы по программам фундаментальных исследований Президиума РАН и Отделения математических наук РАН, причем К.В. Рудаков является координатором программы ОМН РАН "Алгебраические и комбинаторные методы математической кибернетики".

### **Сектор математического моделирования в экологии и медицине**

Сектор математического моделирования в экологии и медицине был основан в 1978 г. профессором Ю.М. Свиричевым. С 1990 г. сектором руководил канд. физ.-матем. наук В.В. Шакин. В 1997 г. сектор вошел в состав отдела математических методов прогнозирования, который возглавляет член-корреспондент РАН К.В. Рудаков.

Основное направление работ сектора — математическое и информационное моделирование поведения живых систем, применение современных методов вычислительной математики для решения задач экологии, биологии и медицины, исследование вопросов интегральной оценки сложных объектов. При анализе поведения сложных систем важно уметь описывать их состояния наиболее просто, применяя методы снижения размерности признакового пространства. Для этого В.В. Шакиным и В.В. Стрижовым был предложен метод согласования экспертных оценок при построении интегральных индикаторов. Метод заключается в поиске компромиссного решения: требуется разрешить противоречие между интегральными индикаторами объектов, весами показателей и измеряемыми данными. С помощью этого метода были построены: интегральные индикаторы качества жизни в российских регионах; индекс развития человеческого потенциала в России; Kyoto-index - индекс влияния электростанций США на окружающую среду; индекс



эффективности руководства государственными заповедниками России; индекс редких и краснокнижных видов России; эконометрический индекс состояния российской экономики; индекс эффективности вузовской науки Министерства образования России.

Для анализа данных “объект-признак-время” В.В. Шакиным и Т.В. Казаковой был предложен метод трехмерного сингулярного разложения. Этот метод был применен при ранжировании продуктов питания по критерию загрязнения химическими контаминантами.

На основе мультимедийной базы данных Гематологического научного центра РАМН В.В. Шакиным и Г.О. Пташко был разработан алгоритм классификации историй болезней пациентов клинического отделения. Метод заключается в шкалировании фазовых траекторий историй болезни и последующей кластеризации с использованием матрицы парных расстояний.

Для моделирования поведения систем В.В. Стрижовым был предложен метод построения параметрических моделей оптимальной сложности. При решении задачи многомерной нелинейной регрессии набор регрессионных моделей-кандидатов рассматриваются как произвольные суперпозиции гладких параметрических функций, назначаемых экспертами. После нахождения параметров этих моделей, производится их информационное сравнение. По результатам сравнения итеративно рассматриваются следующие производные наборы моделей.

Сектор поддерживает сотрудничество с Центральным экономико-математическим институтом РАН, кафедрой биофизики биологического факультета МГУ, представительством Всемирного союза охраны природы для стран СНГ, Департаментом охраны окружающей среды Министерства природных ресурсов РФ. В рамках конференции “Математика. Компьютер. Образование” Сектором проводятся открытые заседания по актуальным проблемам экологии и математики. Так, в 2001 г. проведен круглый стол по проблемам оценки влияния электростанций на окружающую среду, а в 2003 г. проведено заседание, посвященное созданию интегральных индикаторов для оценки значимости угрожаемых видов, занесенных в Красную книгу РФ.

Научные работы сектора поддержаны грантами РФФИ, РГНФ, INTAS и Швейцарского научного фонда SNSF.

Сотрудники отдела ведут активную преподавательскую работу. К.В. Рудаков с 1997 г. — профессор факультета ВМиК МГУ, с 2004 г. — заведующий кафедрой “Интеллектуальные системы” ФУПМ МФТИ, К.В. Воронцов с 2004 г. — заместитель заведующего этой же кафедры, В.В. Шакин преподавал на Экологическом факультете Международного независимого эколого-политологического университета (МНЭПУ).

С 2002 г. сотрудники Отдела активно участвуют в организации Международной Конференции “Интеллектуализация обработки информации” (сопредседатели оргкомитета конференции — Ю.И. Журавлев и К.В. Рудаков). Конференция проводится в Крыму, ее организатор — ученик Ю.И. Журавлева, декан математического факультета Симферопольского государственного университета, доктор физ.-матем. наук В.И. Донской.

В 2000 г. для того, чтобы обеспечить работой многочисленных учеников Ю.И. Журавлева и К.В. Рудакова — выпускников МГУ и МФТИ — была создана инновационная компания Foresys (ЗАО “Форексис”), которая в 2002 г. стала победителем первого “Конкурса Русских инноваций”, проводимого журналом “Эксперт”. В настоящее время в компании работают уже более 20 молодых ученых. Отдел осуществляет научное руководство компанией, разработки которой полностью базируются на оригинальных информационных технологиях, воплощающих фундаментальные математические разработки научной школы. Продукты компании Foresys ориентированы на банки, розничные торговые сети, телекоммуникационные и страховые компании, электронные магазины, организаторов биржевых торгов, эмитентов пластиковых карт. Практически любая компания, фиксирующая в электронном виде информацию о своих действиях и действиях клиентов, является потенциальным потребителем продуктов и услуг Foresys. Программные продукты компании Foresys используют ММВБ, РАО ЕЭС, ТД “Перекресток”, Правительство Москвы, Банк Петрокоммерц, Мобильные ТелеСистемы и др.

### **Заключение**

Работа по основным научным направлениям сотрудниками отделов математических проблем распознавания и методов дискретного анализа и вычислительных методов прогнозирования ведется согласованно. Совместно организуются многие научные мероприятия. Так, начиная с

1983 г., каждые два года проводится Всесоюзная – Всероссийская научная конференция “Математические методы распознавания образов” (ММРО) — самый представительный в России форум, посвященный математическим вопросам распознавания, прогнозирования, data mining и смежным проблемам современной прикладной математики. Проведено всего 11 конференций. Регулярно (раз в два года) проводится Международная конференция “Распознавание образов и обработка изображений. Новые информационные технологии”. Проведено всего 8 конференций. Большую роль в поддержке научных работ играют открытые Российско–Германские симпозиумы. Всего проведено 6 симпозиумов.

Основные работы сотрудники отделов публикуют в таких ведущих научных журналах, как “Доклады РАН”, “ЖВМ и МФ”, “Кибернетика”, “Дискретный анализ”, “Pattern Recognition and Image Analysis”. Последний журнал создан по инициативе Ю.И. Журавлева, в его издании существенную помощь оказывают сотрудники отделов.

На протяжении многих лет сотрудники обоих отделов успешно реализовывали проекты Министерства образования и науки РФ. В последние годы отделы активно работают по программам фундаментальных исследований РАН.

В последние годы в отделы снова активно приходят новые молодые сотрудники. Это связано в первую очередь с тем, что в МГУ им. М.В. Ломоносова и МФТИ открылись кафедры, готовящие специалистов по профилю отделов. Кафедрами руководят Ю.И. Журавлев и К.В. Рудаков. Начиная с 3-го курса, студенты, выбравшие в качестве базовых эти кафедры, проходят стажировку в ВЦ РАН, сочетая учебу с исследовательской работой. Руководителями студентов-стажеров являются научные сотрудники отделов. Таким образом реализован и успешно работает реальный научно-образовательный комплекс.

Главная линия развития отделов — это сочетание молодости и опыта, фундаментальной науки и актуальных приложений.

### Хроника событий

1969 г. — основание лаборатории проблем распознавания ВЦ АН СССР.

1978 г. — образование сектора автоматического распознавания речи.

1984 г. — Ю.И. Журавлев избран членом-корреспондентом АН СССР; В.К. Леонтьев стал доктором физ.-матем. наук; К.В. Рудаков стал Лауреатом премии Ленинского комсомола в области науки и техники.

1985 г. — преобразование лаборатории в отдел проблем распознавания и методов комбинаторного анализа ВЦ АН СССР.

1986 г. — Ю.И. Журавлев и П.П. Кольцов стали лауреатами премии Совета Министров СССР; Ю.И. Журавлев награжден орденом Дружбы Народов.

1991 г. — начало издания Международного научного журнала “Pattern Recognition and Image Analysis”.

1992 г. — Ю.И. Журавлев избран действительным членом (академиком) РАН; К.В. Рудаков стал доктором физ.-матем. наук.

1993 г. — Ю.И. Журавлев избран иностранным членом Испанской королевской академии докторов.

1994 г. — В.В. Рязанов стал доктором физ.-матем. наук.

1995 г. — В.И. Хомич стал доктором физ.-матем. наук.

1996 г. — образована кафедра математических методов прогнозирования ВМиК МГУ им. М.В. Ломоносова (зав. Ю.И. Журавлев); на Всемирном салоне изобретений в Брюсселе системе ЛОРЕГ, части системы SOLO, разработанной сотрудниками отдела (В.А. Ворончихин, Ю.И. Журавлев, С.Б. Ларин, Н.Н. Катериночкина, В.В. Рязанов, О.В. Сенько) присуждена Золотая медаль с отличием.

1997 г. — К.В. Рудаков избран членом-корреспондентом РАН; Е.В. Дюкова стала доктором физ.-матем. наук; выделение из состава отдела проблем распознавания и методов комбинаторного анализа нового отдела вычислительных методов прогнозирования (зав. К.В. Рудаков); большая группа сотрудников отделов награждена медалями “В память 850-летия Москвы”;

1998 г. — Ю.А. Зуев стал доктором физ.-матем. наук.



*На праздновании 70-летнего юбилея Ю.И. Журавлева.  
Академик РАН Ю.И. Журавлев и члены-корреспонденты  
РАН В.Л. Матросов, К.В. Рудаков, Н.Н. Кудрявцев*



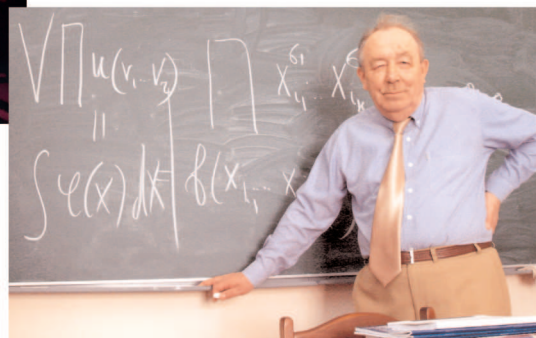
*Ю.И. Журавлев  
и академик М.Н. Лаврентьев.  
Новосибирск, 1966*

*Празднование 75-летнего юбилея  
члена-корреспондента РАН  
Д.П. Костомарова. ВМиК МГУ, 2004 г.  
Академик РАН Ю.И. Журавлев  
и члены-корреспонденты РАН К.В. Рудаков  
и Д.П. Костомаров*



*МГУ, 2004 г.  
Ректор МГУ академик В.А. Садовничий  
вручает академику Ю.И. Журавлеву  
Ломоносовскую премию I степени*

*Академик Ю.И. Журавлев в своем кабинете.  
ВЦ РАН, 2004 г.*





*Академик Ю.И. Журавлев в компьютерном зале.  
ВЦ РАН, 2004 г.*



*Конференция "Математические  
методы распознавания образов-10",  
Звенигород, 2001 г.  
Член-корреспондент РАН  
К.В. Рудаков*



*Конференция "Математические методы  
распознавания образов-10",  
Звенигород, 2001 г.  
Кандидаты наук В.В. Стрижов,  
В.В. Шакин и И.А. Рейер*

*Конференция "Математические методы  
распознавания образов-11", Пуццино, 2003 г.  
Член-корреспондент РАН К.В. Рудаков,  
академик РАН Ю.И. Журавлев  
и кандидат физико-математических наук  
К.В. Воронцов*



*Andrey S. Dnyakin (c) 2003*

1999 г. — Ю.И. Журавлев награжден орденом “За заслуги перед Отечеством” IV степени, ему присвоено почетное звание “Заслуженный профессор МГУ”; К.В. Воронцов удостоен золотой медали РАН для молодых ученых и студентов ВУЗов за лучшую научную работу.

2000 г. — Ю.И. Журавлев избран иностранным членом Национальной академии наук Украины и стал Почетным доктором Самарского аэрокосмического университета; А.Г. Дьяконов награжден Золотой медалью РАН для молодых ученых и студентов ВУЗов за лучшую научную работу; сотрудниками отделов основана инновационная компания “Форексис”.

2002 г. — Е.А. Карацуба стала доктором физ.-матем. наук; технология анализа клиентских сред стала победителем первого Конкурса Русских Инноваций (компания “Форексис”, В.А. Батарин, К.В. Воронцов, А.Н. Громов, Ю.И. Журавлев, К.В. Рудаков, А.А. Черепнин, Ю.В. Чехович).

2003 г. — Ю.И. Журавлев и К.В. Рудаков стали лауреатами Ломоносовской премии I степени (МГУ); образована кафедра “Интеллектуальные системы” ФУПМ МФТИ (зав. К.В. Рудаков).

2004 г. — Ю.И. Журавлев избран академиком Европейской академии наук и награжден Кавалерским крестом Ордена Почета (Польша); И.Б. Гуревич стал Почетным членом Международной Ассоциации распознавания образов (IAPR Fellow).

2005 г. — Ю.И. Журавлев избран почетным академиком Российской академии образования (РАО) и ему присвоено почетное звание “Заслуженный профессор МФТИ”.

## Персоналии

### Отдел математических проблем распознавания и методов комбинаторного анализа

**Журавлев Юрий Иванович.** Родился 14 января 1935 г. в г. Воронеже, окончил мужскую среднюю школу № 6 в г. Фрунзе (ныне Бишкек) в 1952 г., в 1952–1957 гг. — студент механико-математического факультета МГУ, в 1957–1959 гг. — аспирант Отделения математики механико-математического факультета МГУ, доктор физ.-матем. наук (1965), диссертация защищена в Институте математики Сибирского отделения АН СССР на тему “Локальные алгоритмы вычисления информации”, профессор (1967) по кафедре алгебры и математической логики, член-корреспондент АН СССР (1984), академик РАН (1992), Иностранный член Испанской королевской академии докторов (1993) и Национальной Академии наук Украины (1999), член Европейской академии наук (2004), почетный академик Российской академии образования (РАО), лауреат Ленинской премии (1966), премии Совета Министров СССР (1986), Ломоносовской премии I степени (МГУ, 2003), заслуженный профессор МГУ (1999) и МФТИ (2005), почетный доктор Самарского аэрокосмического университета (2000). Награжден орденами “Трудового Красного Знамени” (1967), Дружбы народов (1986), “За заслуги перед Отечеством IV степени” (1999), золотой медалью Артура Беккера (ГДР, 1968), Кавалерским крестом Ордена Почета (Польша, 2004), большим числом ведомственных наград.

С 1985 г. заведует отделом проблем распознавания и методов комбинаторного анализа ВЦ АН СССР, с 1989 г. — отделом математических проблем распознавания и методов комбинаторного анализа, заместитель директора ВЦ АН СССР (с 1992 г. — ВЦ РАН) по научной работе. С 1970 г. профессор МФТИ, с 1997 г. — заведующий кафедрой “Математические методы прогнозирования”. В 2003 г. избран руководителем секции “Прикладная математика и информатика”, заместителем академика-секретаря Отделения математических наук РАН. С 1989 г. — член Исполкома Международной ассоциации по распознаванию образов.

В настоящее время Ю.И. Журавлев является председателем Экспертного совета ВАК России по информатике, управлению и вычислительной технике. Более 150 его учеников стали кандидатами и докторами наук.

С 1991 г. — главный редактор международного журнала “Pattern Recognition and Image Analysis”, член редколлегии 5 журналов, в том числе “ЖВМ и МФ”, “Кибернетика и системный анализ”, “Дискретный анализ и исследование операций”. Ю.И. Журавлевым опубликовано более 200 научных трудов в совместных, российских и зарубежных изданиях.

*Основные публикации:*

1. Теоретико-множественные методы в алгебре логики // Проблемы кибернетики. Вып. 8, Москва: Физматгиз, 1962. С. 5–44.
2. Оценка сложности построения минимальных дизъюнктивных нормальных форм для функций алгебры логики. Дискретный анализ // Сб. научных трудов. Вып. 3. Новосибирск. Ин-т математики. СО АН СССР, 1964. С. 41–77.
3. Локальные алгоритмы вычисления информации I, II. Кибернетика: I — 1965. № 1. С. 12–19; II — 1966. № 2. С. 1–11.
4. Корректные алгебры над множеством некорректных (эвристических) алгоритмов I, II, III. Кибернетика: I — 1977. № 4. С. 21–27; II — 1977. № 6. С. 21–27; III — 1978. № 2. С. 35–43.
5. Об алгебраическом подходе к решению задач распознавания или классификации // Проблемы кибернетики. Вып. 33. М.: Физматгиз, 1978. С. 5–68.

*На английском языке:*

1. Algebraic Methods for Designing Algorithms for Pattern Recognition and Forecasting. Pattern Recognition and Image Analysis. 1999. Vol. 9, № 4. P. 790–791.
2. Об алгоритмах распознавания с представительными наборами (о логических алгоритмах) // Ж. вычисл. матем. и матем. физики. 2002. Т. 42, № 9. С. 1425–1435.

**Леонтьев Владимир Константинович.** Родился 10 января 1942 г. Окончил Новосибирский Государственный университет в 1964 г. Работает в Вычислительном центре АН СССР (с 1992 г. — РАН) с 1970 г. В настоящее время ведущий научный сотрудник, и. о. зав. сектором методов комбинаторного анализа. Доктор физ.-матем. наук (1984), профессор (1986).

Основные научные результаты получены в областях: комбинаторный анализ, теория информации и кодирования, дискретная оптимизация.

В.К. Леонтьев работает профессором в МГУ им. М.В. Ломоносова и МФТИ. Среди его учеников 16 кандидатов и 2 доктора наук.

**Рязанов Владимир Васильевич.** Родился 11 июня 1950 г. в г. Лобня Московской области. Окончил среднюю школу № 1 г. Долгопрудного в 1967 г. В том же году поступил в МФТИ на факультет АПМ (с 1969 г. ФУПМ), который окончил в 1973 г. Обучался в аспирантуре ВЦ АН СССР (1973–1976). С 1976 г. работает в ВЦ АН СССР (с 1992 г. — ВЦ РАН).

В настоящее время ведущий научный сотрудник, исполняющий обязанности зав. сектором прикладных проблем распознавания.

Доктор физ.-матем. наук (1994), тема диссертации: “Оптимальные коллективные решения в задачах распознавания и классификации”. С 1987 г. — старший научный сотрудник. Награжден медалью “В память 850-летия Москвы”. Член редколлегий журналов “Pattern Recognition and Image Analysis”, “Computacion y Systemas”.

*Основные публикации:*

1. О синтезе классифицирующих алгоритмов на конечных множествах алгоритмов классификации (таксономии) // ЖВМиМФ. 1982. Т. 22, № 2. С. 429–440.
2. О построении оптимальных алгоритмов распознавания и таксономии (классификации) при решении прикладных задач // Распознавание, классификация, прогноз: Матем. методы и их применение. М.: Наука, 1988. Вып.1. С. 229–279.
3. Recognition Algorithms Based on Local Optimality Criteria // Pattern Recognition and Image Analysis, 1994. Vol.4, № 2. P. 98–109.

**Чучупал Владимир Яковлевич.** Родился в г. Москве 19 октября 1953 г. Окончил математический факультет МГПИ им. В.И. Ленина в 1976 г. В 1980–1984 гг. — аспирант ВЦ АН СССР, кандидат наук (1984 г.). С 1984 г. работает в ВЦ АН СССР (с 1992 г. — ВЦ РАН).

В настоящее время заведует сектором распознавания и цифровой обработки речевых сигналов отдела математических проблем распознавания и методов комбинаторного анализа.

**Зуев Юрий Александрович.** Родился 24 апреля 1949 г. Окончил МФТИ в 1973 г., аспирантуру ВЦ в 1979 г. Канд. физ.-матем. наук (1980). Доктор физ.-матем. наук (1998), доцент (1993). Работает в ВЦ с 1980 г. Область научных интересов: комбинаторный анализ, распознавание образов, дискретная оптимизация, пороговая логика. Первые научные результаты получены под руководством Ю.И. Журавлева. Они относятся к проблеме коррекции алгоритмов распознавания и задаче о покрытии. Эти результаты составили содержание кандидатской диссертации “Коррекция алгоритмов распознавания и смежные задачи дискретной оптимизации”. Наиболее значительные результаты, полученные Ю.А. Зуевым, относятся к пороговым функциям алгебры

логики и вошла в его докторскую диссертацию “Вероятностные методы в пороговой логике”. Научную деятельность совмещает с преподаванием в Московском государственном университете технологии и управления (профессор кафедры физики и высшей математики). Автор ряда учебно-методических пособий по математической логике и дискретной математике и более чем 50 научных работ. Член Американского Математического Общества.

**Карацуба Екатерина Анатольевна.** Родилась 1 июня 1963 г. в г. Москве. Окончила МГУ им. М.В. Ломоносова в 1986 г., доктор физ.-матем. наук (2002), ведущий научный сотрудник.

**Хомич Валентин Иванович.** Родился 3 октября 1941 г. в деревне Старое Заповолье Глубокского р-на Витебской обл., Беларусь. В 1958 г. закончил среднюю школу № 36 станции Крулевщина Калининской ж. д. В 1959 г. поступил в Белорусский государственный университет, который закончил в 1965 г. по специальности “математика”. С апреля 1970 г. по настоящее время работает в ВЦ РАН. В 1972 г. стал канд. физ.-матем. наук, а в 1995 г. — доктором физ.-матем. наук.

В.И. Хомич с 1996 г. по настоящее время работает по совместительству профессором в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана. Имеет медаль “В память 850-летия Москвы”.

Тема докторской диссертации “Проблема делимости в пропозициональных исчислениях”. Опубликовал 42 работы.

*Основные публикации:*

1. Хомич В.И. О проблеме делимости для суперинтуиционистских пропозициональных логик // Доклады АН СССР. 1980. Т. 254, № 4. С. 820–823.
2. Хомич В.И. Об отдельных суперинтуиционистских пропозициональных исчислениях и о конъюнктивно неразложимых элементах в импликативных полуструктурах // Zeitschrift für mathematische Logik und Grundlagen der Mathematik. 1986. Bd 32, № 2. S. 149–180.
3. Хомич В.И. О свойстве простой подстановки для суперинтуиционистских пропозициональных логик и о его связи с их свойством делимости // Известия РАН. Серия математическая. 2003. Т. 67, № 2. С. 181–210.

**Виноградов Александр Петрович.** Родился 17 января 1951 г. в г. Арамилы Свердловской области. В 1968 г. поступил в Московский физико-технический институт, который окончил в 1974 г. по специальности “системы автоматического управления”. По окончании аспирантуры МФТИ в 1978 г. защитил в Вычислительном центре СССР кандидатскую диссертацию по специальности “математическая кибернетика”. С 1977 г. по 1991 г. — в Научно-исследовательской части МФТИ, с 1991 г. — в Вычислительном центре РАН в должности старшего научного сотрудника.

Область исследований и интересов — распознавание образов, обработка изображений, применение геометрических и алгебраических методов в задачах анализа данных.

Виноградов А.П. является автором 45 научных публикаций.

*Основные публикации:*

1. Виноградов А.П. О существовании мажорантного локального алгоритма в эффективно описуемых задачах вычисления информации // Докл. АН СССР. 1977. Т. 4.
2. Vinogradov A.P., Ryazanov I.V. Permutation Coding with the usage of special metrics on groups  $S_n$  and  $B_n$  // Pattern Recognition and Image Analysis. 2000. № 1. P. 53–56.
3. Biryukov A.A., Ryazanov V.V., Ryazanov I.V., Vinogradov A.P. Reconstruction of Some Cluster Densities by Empirical Densities of Mixtures // Pattern Recognition and Image Analysis. 2001. Vol. 11, № 1. P. 13–15.
4. Виноградов А.П. Алгоритм генерирования комплекта парзеновских сеток для многомерной выборки // Int. Conf. “Knowledge-Dialog-Solution” (KDS-2002), Sankt-Peterburg, 2001. P. 97–101.
5. Vinogradov A., Voracek J., Zhuravlev Yu. Stochastic Filtering of Approximate Symmetries in Thick Packs of Clusters // Pattern Recognition and Image Analysis. 2005. Vol. 15, № 12 (to appear).

**Вялый Михаил Николаевич,** старший научный сотрудник. Родился 23 февраля 1961 г. Окончил МФТИ в 1984 г., аспирантуру ВЦ в 1987 г. Канд. физ.-матем. наук (1995). Работает в ВЦ с 1993 г. Область научных интересов: комбинаторный анализ, дискретная оптимизация, теория вычислительной сложности, квантовые вычисления, вычислительная геометрия. Автор более чем 20 научных работ.

В области вычислительной геометрии М.В. Вялый (совместно с С.П. Тарасовым) построил эффективные алгоритмы для решения ряда задач вычислительной топологии, имеющих прикладное значение при анализе и построении трехмерных изображений. Эти результаты докладывались на международных конференциях по вычислительной сложности (АСМ Symposium on Computational Geometry, 1997, 1998). Помимо этого им (совместно с Э.Н. Гордеевым и С.П. Тарасовым) изучена задача устойчивости диаграмм Вороного (ЖВМ и МФ, 1996). В последующем научные интересы М.Н. Вялого сосредоточились в области теории вычислительной сложности и, в частности, квантовых вычислений. Он является одним из авторов учебной монографии, в которой впервые на русском языке дано подробное изложение основных результатов в области квантовой теории сложности (А. Китаев, А. Шень, М. Вялый, “Классические и квантовые вычисления”, М.: МЦНМО-ЧеРо, 1998). Более подробное изложение связей между различными моделями квантовых вычислений и их отношением с классическими классами сложности дано в написанном им совместно с Н.П. Варновским обзоре “Проблемы теории сложности квантовых вычислений” (сборник “Московский университет и развитие криптографии в России”, М.: МЦНМО, 2003). М.Н. Вялый — ответственный секретарь научно-популярного сборника “Математическое просвещение” (третья серия этого сборника издается с 1997 г.).

**Гуревич Игорь Борисович.** Родился 24 августа 1938 в г. Москве. Окончил среднюю школу в Москве (1955), Московский энергетический институт (1961), канд. физ.-матем. наук (1975) (научный руководитель — Ю.И. Журавлев). Ученое звание — старший научный сотрудник (1987). С 1960 г. по 1985 г. работал в ряде московских производственных, отраслевых и медицинских научно-исследовательских организаций и ВУЗов, с 1985 г. по 2004 г. в Научном совете по комплексной проблеме “Кибернетика” РАН, с 2005 г. — заведующий отделом Вычислительного центра им. А.А. Дородницына РАН. Доцент кафедры “Математические методы прогнозирования” факультета вычислительной математики и кибернетики МГУ им. М.В. Ломоносова (с 1997 г.). Ответственный секретарь Российской общественной организации “Ассоциация распознавания образов и анализа изображений” (РАРОАИ); член правления Международной ассоциации распознавания образов (International Association for Pattern Recognition), представитель РАРОАИ в IAPR; член правления Союза научных обществ России. Почетный член Международной ассоциации распознавания образов (IAPR Fellow) (2004). Ответственный секретарь редакционной коллегии ежегодника “Распознавание. Классификация. Прогноз”, издательство “Наука”; заместитель главного редактора международного журнала “Pattern Recognition and Image Analysis. Advances in Mathematical Theory and Applications”, МАИК “Наука/Interperiodica Publishing”. Область научных интересов: математическая кибернетика, математическая теория распознавания образов, теория анализа и оценивания информации, представленной в виде изображений, медицинская информатика. Автор свыше 120 научных работ, в т. ч. 2 монографии (в соавторстве), имеет 4 патента Российской Федерации.

*Основные публикации:*

1. *Гуревич И.Б.* О невычислимости в классе локальных алгоритмов некоторых предикатов, связанных с задачей минимизации булевых функций // Кибернетика. 1974. № 2. (март-апрель). Киев: Наукова думка, 1974. С. 24–30.
2. *Гуревич И.Б.* Проблема распознавания изображений // Распознавание, классификация, прогноз. Математические методы и их применение: Ежегодник. Вып. 1. / Под ред. Ю.И. Журавлева. М.: Наука, 1988. С. 280–329.
3. *Gurevitch I.B.* The Descriptive Framework for an Image Recognition Problem // Proceedings of The 6th Scandinavian Conference on Image Analysis (Oulu, June 19–22, 1989): in 2 volumes. Pattern Recognition Society of Finland, 1989. Vol. 1. P. 220–227.
4. *Gurevitch I.B.* A Descriptive Method for Image Analysis Based on the Synthesis of an Image Model in the Class of Disjunctive Normal Forms // Pattern Recognition and Image Analysis: Advances in Mathematical Theory and Applications. 1995. Vol. 5, № 3. P. 356–363.
5. *Gurevitch I.B., Zhuravlev Y.I.* An Image Algebra Accepting Image Models and Image Transforms // Proceedings of the 7th International Workshop “Vision, Modeling, and Visualization 2002” (VMV2002), November 20–22, 2002, Erlangen, Germany [G. Greiner, H. Niemann, T. Ertl, B. Girod, H.-P. Seidel (Eds.)], IOS Press, B.V. Amsterdam, Infix, Akademische Verlagsgesellschaft, Aka GMBH, Berlin, 2002. P. 21–26.



6. Gurevitch I.B., Yashina V.V. Descriptive Image Algebras with One Ring // Pattern Recognition and Image Analysis: Advances in Mathematical Theory and Applications. 2003. Vol. 13, № 4. P. 579–599.
7. Gurevitch I.B. The Descriptive Approach to Image Analysis. Current State and Prospects // Image Analysis. 14th Scandinavian Conference, SCIA2005, Joensuu, Finland, June 2005, Proceedings / Heikki Kalviainen, Jussi Parkkinen, Arto Kaarna (Eds.): LNCS 3540. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005. P. 214–223.

**Дьяконов Александр Геннадьевич.** Родился 13.07.1979 в г. Ивантеевке Московской обл., окончил с отличием факультет ВМиК МГУ (2001), аспирантуру (2003). Канд. физ.-матем. наук (2003). Награжден золотой медалью РАН для молодых ученых и студентов ВУЗов за лучшую научную работу (2000). Автор 11 научных публикаций по дискретной математике.

*Основные публикации:*

1. Построение дизъюнктивные нормальных форм в логических алгоритмах распознавания // ЖВМ и МФ. 2000. Т. 40, № 7. С. 1899–1907.
2. Построение д.н.ф. последовательным перемножением // ЖВМ и МФ. 2003. Т. 43. № 10. С. 1569–1580.

**Катериночкина Наталья Николаевна** — старший научный сотрудник, канд. физ.-матем. наук.

Катериночкина Н.Н. родилась 27 марта 1945 г. в г. Свердловске, окончила в 1967 г. Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова по специальности “математика” и аспирантуру механико-математического факультета МГУ в 1970 г. С апреля 1971 г. работает в ВЦ РАН, с 1978 г. — канд. физ.-матем. наук. Является известным специалистом в области дискретной математики и ее приложений. Автор 35 научных работ.

*Основные публикации:*

1. Поиск максимального верхнего нуля монотонной функции алгебры логики // ДАН СССР. 1975. Т. 224. № 3. С. 557–560.
2. Поиск максимального верхнего нуля для одного класса монотонных функций  $k$ -значной логики // ДАН СССР. 1977. Т. 234, № 4. С. 746–749.
3. О множествах, содержащих наибольшее число попарно не сравнимых  $n$ -мерных  $k$ -ичных наборов // Математические заметки. 1978. Т. 24. № 3. С. 367–374.
4. Поиск максимального верхнего нуля для одного класса монотонных функций  $k$ -значной логики // ЖВМ и МФ. 1981. Т. 21. № 2. С. 470–481.
5. О задаче поиска максимального верхнего нуля для ряда подклассов монотонных булевых функций // ЖВМ и МФ. 1987. Т. 27, № 9. С. 1402–1411.
6. Методы выделения максимальной совместной подсистемы системы линейных неравенств. М.: ВЦ РАН, 1997. С. 1–15.
7. Локальные методы решения одного класса задач целочисленного линейного программирования // ЖВМ и МФ. 1998. Т. 38, № 1. С. 1–5.
8. N. Katerinochkina, V. Ryazanov. On Knowledge Generalization in Logical Recognition Models // Pattern Recognition and Image Analysis. 2003. Vol. 13, № 1. P. 40–42.

**Мадатян Хикар Асилбекович,** старший научный сотрудник. Родился 14 июня 1935 г. Окончил Ереванский университет в 1959 г., аспирантуру МГУ в 1964 г. Работает в ВЦ с 1971 г. Канд. физ.-матем. наук (1973), ученое звание старший научный сотрудник (1987). Х.А. Мадатян является известным специалистом в области теории надежности и контроля дискретных устройств. Ему принадлежат важные результаты в теории самокорректирующихся схем и теории тестов.

*Основные публикации:*

1. Мадатян Х.А. Синтез схем корректирующих размыкание контактов // ДАН СССР. 1964. Т. 199, № 2. С. 290–293.
2. Мадатян Х.А. Синтез контактных схем ограниченной ширины // Проблемы кибернетики. 1965. № 14. С. 301–307.
3. Мадатян Х.А. Полный тест для неповторных контактных схем // Проблемы кибернетики. 1970. № 23. С. 103–118.
4. Мадатян Х.А. О реализации не всюду определенных матриц заданной “густоты” вентильными схемами глубины два // Кибернетика. 1973. № 6. С. 12–15.
5. Мадатян Х.А. О корректировке совокупности алгоритмов распознавания схемами из функциональных элементов // ДАН СССР. 1980. Т. 255, № 2. С. 286–290.

6. *Мадатян Х.А.* О полных проверяющих тестах для квазибесповторных контактных схем // Дискретная математика. 1996. Т. 8. Вып. 3. С. 111–118.
7. *Мадатян Х.А.* О тупиковых тестах для бесповторных таблиц // ЖВМ и МФ. 1997. Т. 37, № 2. С. 243–249.
8. *Мадатян Х.А.* Об одном алгоритме построения тупиковых тестов для бинарных таблиц // ЖВМ и МФ. 1998. Т. 38, № 4. С. 698–704.

**Сенько Олег Валентинович** — старший научный сотрудник, канд. физ.-матем. наук. Родился 25 сентября 1957 г. в г. Салават БАССР. В 1981 г. окончил МФТИ. С 1987 г. работает в ВЦ РАН. В 1990 г. защитил кандидатскую диссертацию.

Область научных интересов: математические методы распознавания и прогнозирования. Основные направления исследований — разработка средств повышения точности прогнозирования путем повышения устойчивости процедур обучения.

Другими направлениями исследования является разработка новых методов анализа данных, основанных на поиске оптимальных систем статистически верифицированных закономерностей в признаковом пространстве.

Сенько О.В. опубликованы 60 научных работ.

*Основные публикации:*

1. *Ryazanov V.V., Senko O.V., and Zhuravlev Yu.I.* Methods of recognition and prediction based on voting procedures // Pattern Recognition and Image Analysis. 1999. Vol. 9, № 4. P. 713–718.
2. *Senko O.V.* The Use of Collective Methods for Improvement of Regression Modeling Stability. Internet statistical journal INTERSTAT, <http://interstat.statJournals.net>. June, 2004.
3. *Сенько О.В.* Перестановочный тест в методе оптимальных разбиений // ЖВМиМФ. 2003. № 9. С. 1438–1447.
4. *O.V. Sen'ko.* A Method for Estimating Adequacy of Approximation Models // Pattern Recognition and Image Analysis. 2001. Vol. 11, № 1. P. 85–86.
5. *A.M. Jackson, A.V. Ioshina, O. Senko, A. Kuznetsova, A. Sundan, M.A. O'Donnel, S. Clinton, A.B. Alexandroff, P.J. Selby, K. James and V.A. Kuznetsov.* Prognosis of Intravesical Bacillus Calmette Guerin Therapy for Superficial Bladder Cancer by Immunological Urinary Measurements: Statistically Weighted Syndromes Analysis // Journal of Urology, 1998. V. 159. P. 1054–1063.

**Шваргин Сергей Михайлович.** Родился 26 мая 1924 г. Окончил 1-е Томское артиллерийское училище, участник Великой Отечественной войны, кавалер боевых орденов и медалей. В 1953 г. окончил Военную инженерно-артиллерийскую академию им. Ф.Э. Дзержинского (1953), канд. физ.-матем. наук (1966). Работает в ВЦ АН СССР (с 1992 г. — ВЦ РАН) с ноября 1969 г. Преподавал в МФТИ, МГПИ, МВТУ им. Н.Э.Баумана, специалист в области дискретной оптимизации.

#### Отдел вычислительных методов прогнозирования

**Рудаков Константин Владимирович.** Зав. отделом, член-корреспондент РАН, родился 21 июня 1954 г. в г. Верее Московской области.

Закончил в 1971 г. школу № 17 в г. Мытищи. В том же году поступил в Московский физико-технический институт на факультет управления и прикладной математики. Окончил институт в 1978 г. и поступил в аспирантуру Вычислительного центра АН СССР. В июне 1981 г. был отчислен из аспирантуры в связи с защитой кандидатской диссертации “О некоторых классах алгоритмов распознавания”. С января 1982 г. по настоящее время работает в Вычислительном центре АН СССР (РАН).

Во время учебы в МФТИ интенсивно занимался изучением функционального анализа, топологии, алгебры, математической логики и дискретного анализа.

В 1984 г. стал лауреатом премии Ленинского комсомола в области науки и техники. Докторскую диссертацию “Теория универсальных и локальных ограничений для алгоритмов распознавания” защитил в ВЦ РАН в январе 1992 года. В мае 1997 г. был избран членом-корреспондентом РАН. В 2003 г. совместно с академиком Ю.И. Журавлевым стал лауреатом Ломоносовской премии I-й степени.

Основные научные результаты посвящены развитию алгебраического подхода к синтезу корректных алгоритмов на основе эвристических информационных моделей, основы которого были заложены Ю.И. Журавлевым в середине 70-х гг. прошлого века.

С 1997 г. — профессор кафедры Математических методов прогнозирования ВМиК МГУ.

**Шакин Всеволод Владимирович (1941–2005)** работал в ВЦ РАН с 1985 г., с 1990 г. в должности заведующего сектором математического моделирования в экологии и медицине.

Высшее образование В.В. Шакин получил, окончив с отличием факультет автоматики и вычислительной техники Московского энергетического института по специальности “Математические и счетно-решающие приборы и устройства”. Ученая степень канд. физ.-матем. наук была присуждена В.В. Шакину в 1972 г. после успешной защиты диссертации по теме “Алгоритмический анализ ЭКГ как векторных функций” в Ученом совете Института биологической физики АН СССР.

Научная деятельность Всеволода Владимировича Шакина была связана с работой по применению вычислительной техники, математического моделирования и математических методов в научных исследованиях, главным образом в области экологии и медицины. За время работы в ВЦ РАН В.В. Шакиным и под его руководством было разработано множество математических моделей живых систем, а также алгоритмы и программные средства для обработки медико-биологических и экологических данных. Большой научный интерес и прикладное значение имеет разработанный им подход к моделированию разнообразных живых систем (биоценозов, популяций, организмов и других сложных систем) в экстремальных условиях, с целью прогноза и предотвращения экстремальных ситуаций. Этот подход В.В. Шакин систематически применял в прикладных работах по изучению антропогенных изменений окружающей среды и их влияния на качество жизни, по изучению операторов в экстремальных условиях, а также в работах по медицинской диагностике, профилактике и лечению заболеваний.

Всеволод Владимирович Шакин успешно сочетал свою научную деятельность с организационной и педагогической. Он читал лекции по математическому моделированию в экологии и медицине на кафедре общих проблем управления механико-математического факультета МГУ, на кафедре экологии человека в Международном эколого-политологическом университете, в Институте космических исследований РАН и в Институте биомедицинских проблем министерства здравоохранения; являлся членом оргкомитетов и программных комитетов нескольких международных конференций, профессором Международного центра управления рисками в профилактической медицине в Токио, Япония. Под его научным руководством получили свои кандидатские степени пять аспирантов ВЦ РАН и МГУ.

**Дюкова Елена Всеволодовна (6.04.1945, Москва)** — ведущий научный сотрудник Вычислительного центра РАН.

Окончила среднюю школу № 957 г. Москвы (1962), механико-математический факультет МГУ (1967). Доктор физ.-матем. наук (1997), тема диссертации: “Асимптотически оптимальные методы дискретного анализа информации в задачах распознавания”.

Ученое звание — старший научный сотрудник (1997), доцент по специальности (2004).

С 1967 г. по настоящее время работает в Вычислительном центре РАН. С 1998 г. доцент кафедры математических методов прогнозирования факультета ВМиК Московского Государственного Университета. С 2000 г. по совместительству работает в должности профессора математического факультета Московского Педагогического Государственного Университета.

Имеет около 100 научных трудов.

*Основные публикации:*

1. Об асимптотически оптимальном алгоритме построения тупиковых тестов // ДАН СССР. 1977. Т. 233, № 4. С. 527–530.
2. Асимптотически оптимальные тестовые алгоритмы в задачах распознавания // Пробл. Кибернетики. М.: Наука, 1982. Вып. 39. С. 165–199.
3. Дискретный анализ признаков описаний в задачах распознавания большой размерности // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 2000. Т. 40, № 8. С. 1264–1278 (соавт. Ю.И. Журавлёв).
4. Поиск информативных фрагментов описаний объектов в дискретных процедурах распознавания // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 2002. Т. 42, № 5. С. 741–753 (соавт. Н.В. Песков).
5. О сложности реализации дискретных (логических) процедур распознавания // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 2004. Т. 44, № 3. С. 551–561.

Научные результаты Е.В. Дюковой неоднократно отмечались первыми премиями в проводимых ВЦ РАН конкурсах научных работ.

Награждена медалью “В память 850-летия Москвы” (1997).

**Воронцов Константин Вячеславович**, канд. физ.-матем. наук, научный сотрудник отдела вычислительных методов прогнозирования, сектора проблем информационного моделирования.

Родился 1 апреля 1971 г. в Москве. Окончил среднюю школу с золотой медалью в 1988 г, Московский физико-технический институт с отличием в 1994 г. По окончании очной аспирантуры ВЦ РАН защитил кандидатскую диссертацию на тему “Локальные базисы в алгебраическом подходе к проблеме распознавания” в 1999 г. Работает в ВЦ РАН с 1994 г.

Победитель конкурса молодых ученых, посвященного 275-летию РАН, конкурсов лучших научных работ ВЦ РАН в 2002 г. и 2004 г., награжден Золотой медалью РАН для молодых ученых за лучшую научную работу (1999 г.).

Область научных интересов — математические методы распознавания образов и прогнозирования, интеллектуальный анализ данных, математическая статистика, дискретная математика, методы оптимизации, оптимизационные методы решения задач распознавания и восстановления регрессии.

С 2004 г. — заместитель заведующего кафедрой МФТИ “Интеллектуальные системы” на базе ВЦ РАН. Читает курс лекций “Математические методы обучения по прецедентам”.

Автор 30 научных публикаций, среди них:

1. Рудаков К.В., Воронцов К.В. О методах оптимизации и монотонной коррекции в алгебраическом подходе к проблеме распознавания // Доклады РАН. 1999. Т. 367, № 3. С. 314–317.
2. Воронцов К.В. Комбинаторные оценки качества обучения по прецедентам // Доклады РАН. 2004. Т. 394, № 2. С. 175–178.
3. Воронцов К.В. Комбинаторный подход к оценке качества обучаемых алгоритмов // Математические вопросы кибернетики / под ред. О.Б. Лупанова. 2004.

**Песков Николай Владимирович**. Родился в 1978 г. В 1995 г. поступил в Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова на факультет Вычислительной математики и кибернетики. Начиная с 4-го курса, активно участвовал в научной работе, проводимой в отделе вычислительных методов прогнозирования Вычислительного центра им А.А. Дородницына РАН. В 2000 г. окончил МГУ и поступил в аспирантуру Научного совета по комплексной проблеме “Кибернетика” РАН. В 2004 г. успешно защитил диссертационную работу на соискание ученой степени канд. физ.-матем. наук по специальности теоретические основы информатики. В настоящее время Н.В. Песков работает в ВЦ им А.А. Дородницына РАН в должности младшего научного сотрудника. За время своей научной деятельности им опубликовано 12 научных работ.

**Пржиялковский Владимир Викторович**, выпускник Московского физико-технического института, 1979 г. Закончил аспирантуру ВЦ РАН. Сотрудник Сектора математического моделирования в экологии и медицине. Научные интересы: проектирование и использование баз данных в информационных системах. Составлен набор методических пособий по изучению и освоению технологий БД Oracle, в том числе технологий поддержки, программирования, проектирования БД и обеспечения безопасности данных.

*Основные публикации:*

1. Моделирование биосистем в экстремальных условиях и информационные технологии для анализа динамики качества жизни // Сложные системы в экстремальных условиях / Ред. В.В. Шакин. — М.: ВЦ РАН, 2002 (соавт. К.В. Комиссаров).
2. Комплекс методические руководств по администрированию и программированию СУБД Oracle. М.: УЦ Интерфейс; Интернет-публикации по современным технологиям баз данных.

**Рейер Иван Александрович**. Родился в 1976 г. В 1998 г. окончил факультет вычислительной математики и кибернетики Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова по специальности “Прикладная математика”. С 1998 г. по 2002 г. проходил обучение в очной аспирантуре Вычислительного центра им. А.А. Дородницына РАН. В 2004 г. в диссертационном совете Д002.017.02 ВЦ РАН защитил диссертацию на соискание ученой степени канд. техн. наук по специальности “05.13.11 — Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей” на тему “Методы анализа формы изображений на основе непрерывного гранично-скелетного представления”. С 2003 г. работает в ВЦ РАН по совместительству в должности младшего научного сотрудника. Круг научных интересов: методы обработки и анализа изображений, дискретно-непрерывные преобразования плоских форм на изображениях, языки описания данных. В 1999—2004

гг. опубликовал 18 научных работ. Участвовал в работе и организации всероссийских и международных конференций.

**Стрижов Вадим Викторович**, выпускник Уфимского авиационного института, 1992. Закончил аспирантуру Вычислительного центра им. А.А. Дородницына РАН. Научный сотрудник сектора математического моделирования в экологии и медицине с 2000 г. Канд. физ.-матем. наук, защитил диссертацию по анализу данных и экспертным оценкам в 2002 г..

Научные интересы: теория групп, анализ данных, многомерная статистика, оптимизация.

Проекты:

2004 — 2005 гг. Конструктор регрессионных моделей оптимальной сложности. Цель проекта — создание алгоритмов построения оптимальных моделей физических процессов. Используются принципы стохастической оптимизации и Байесовских нейронных сетей. Создан набор алгоритмов для решения задач оптимизации. В него входят много- и однокритериальные генетические и эволюционные алгоритмы.

2000 — 2003 гг. Построение индикаторов и рейтингов, анализ экспертных оценок. Разработана оригинальная методика построения рейтингов с использованием измеряемых данных и экспертных оценок. Построены следующие рейтинги: интегральные индикаторы качества жизни в российских регионах, Индекс человеческого развития в России, Kyoto-index — индекс влияния электростанций США на окружающую среду, Индекс эффективности руководства государственными заповедниками России, Индекс редких и краснокнижных видов России, Эконометрический индекс состояния Российской экономики, Индекс эффективности вузовской науки Министерства образования России.

**Чехович Юрий Викторович**. Родился в 1976 г. В 1999 г. окончил МФТИ по специальности “Прикладная математика и физика”. С 1999 г. по 2002 г. проходил обучение в очной аспирантуре факультета вычислительной математики и кибернетики Московского государственного университета. Под руководством К.В. Рудакова подготовил и в 2004 г. защитил диссертацию на соискание ученой степени канд. физ.-матем. наук “Элементы алгебраической теории синтеза обучаемых алгоритмов выделения трендов”.

Работает в ВЦ РАН с 2001 г. С 2005 г. — научный сотрудник ВЦ РАН.

Область научных интересов — математические методы распознавания образов и прогнозирования, задачи классификации с теоретико-множественными ограничениями, дискретная математика, методы классификации точечных массивов данных, имитационное моделирование.

В 1999–2005 гг. опубликовал 18 научных работ, в том числе 4 в центральных научных журналах. Участвовал в работе всероссийских и международных конференций. Является ученым секретарем Программного комитета Всероссийской конференции “Математические методы распознавания образов”.

Ю.В. Чехович занимается научно-педагогической деятельностью в МФТИ и ВМиК МГУ им. М.В. Ломоносова. Участвует в ряде проектов РФФИ, Минпромнауки и Отделения математических наук РАН.

*Основные публикации:*

1. Об обучаемых алгоритмах выделения трендов // Искусственный интеллект. 2002. № 2. С. 298–305.
2. Алгебраический подход к проблеме синтеза обучаемых алгоритмов выделения трендов // Доклады Академии наук. 2003. Т. 388, № 1. С. 33–36 (соавт. К.В. Рудаков).
3. Критерии полноты для задач классификации с теоретико-множественными ограничениями // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 2005. Т. 45, № 2. С. 344–353 (соавт. К.В. Рудаков).

## ОТДЕЛ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ПРИКЛАДНЫХ СИСТЕМ

*А.Н. Аверкин, С.К. Дулин, В.Ф. Хорошевский, А.И. Эрлих*

---

Лаборатория теории и проектирования больших систем, с которой и “отсчитывается” история отдела интеллектуальных прикладных систем, была образована осенью 1969 г. по инициативе заместителя директора Вычислительного центра Н.Н. Моисеева, тогда еще члена-корреспондента АН СССР. Руководителем лаборатории стал Гермоген Сергеевич Поспелов, в то время тоже член-корреспондент АН СССР.

Г.С. Поспелов (1914–1998) к моменту образования лаборатории прошел долгий и во многом характерный для ученых его поколения путь — ученик слесаря, студент



*Г.С. Поспелов*

вечернего отделения электротехнического техникума, затем студент отделения автотракторного и авиационного оборудования МЭИ. После защиты диплома, который Советом был признан кандидатской диссертацией, ему оставалось сдать лишь кандидатские экзамены по философии и иностранному языку, но в начале августа 1940 г. Г.С. Поспелов был призван в армию. Ну а затем война, которую он начал в Великих Луках в должности и.о. инженера авиаполка, а закончил капитаном, инженером полка по электрооборудованию на аэродроме Штоцберг в 30 км от Берлина. После окончания войны Г.С. Поспелова вызвали в Управление кадров ВВС и вместо долгожданной демобилизации приказали отправиться на новое место прохождения службы, в ВВА им. Жуковского, где он также прошел все ступени должностной лестницы — от ст. инженера лаборатории, через все преподавательские должности, до начальника электротехнического факультета. В ВВА им. Жуковского Г.С. Поспелов работал до 1964 г., когда он, тогда уже генерал-майор, был назначен заместителем председателя секции прикладных проблем при Президиуме АН СССР. К этому времени он защитил кандидатскую (1949 г.) и докторскую (1956 г.) диссертации

и несколько позже, в 1966 г., был избран членом-корреспондентом АН СССР по Отделению механики и процессов управления.

В исследованиях, выполненных Г.С. Поспеловым за весь период его научной деятельности, можно выделить пять основных направлений: исследования по теории линейных и нелинейных систем автоматического регулирования; исследования в области автоматизации управления полетом летательных аппаратов и теории управления системами большого масштаба, в том числе, большими группами самолетов в процессе активных действий авиации; исследования в области управления большими производственно-экономическими системами, разработка принципов и математических моделей программно-целевого планирования и управления народным хозяйством; исследования в области искусственного интеллекта и интеллектуальных прикладных систем.

Исследования по теории линейных и нелинейных систем автоматического регулирования проводились Г.С. Поспеловым в 1946–1949 гг. и были связаны с разработками автопилотов, быстродействующих сервомеханизмов, следящих систем и инспекторных систем управления летательными аппаратами специального назначения [1]. Ряд важнейших результатов был получен Г.С. Поспеловым совместно с известным ученым в области автоматического управления академиком А.А. Красовским. За исследования по применению нелинейных уравнений в конечных

разностях для описания динамики релейных систем, результаты которых были опубликованы в коллективной монографии “Теории автоматического регулирования” (1969 г.), Г.С. Поспелову была присуждена Государственная премия СССР 1972 года.

Исследования в области автоматизации управления полетом самолета были начаты с решения проблемы автоматизации захода на посадку и снижения самолета к посадочной полосе в сложных метеоусловиях вне видимости земли. Теоретические исследования по автоматизации посадки и директорному управлению сопровождались моделированием в лабораторных условиях и были завершены удачными летными экспериментами. Работы Г.С. Поспелова в этой области стали теоретическим фундаментом, на базе которого были начаты опытные разработки, а затем и серийный выпуск аппаратуры для автоматизации маневров при посадке [2]. В настоящее время такой аппаратурой снабжаются все самолеты во всем мире.

Наряду с научной деятельностью Г.С. Поспелов с 1959 г. вел большую педагогическую работу, систематически читал лекции, руководил подготовкой аспирантов и докторантов. Им были организованы циклы лекционных курсов в ВВА им. Жуковского и в МАИ им. Орджоникидзе.

Дальнейшая научная и педагогическая деятельность Г.С. Поспелова была неразрывно связана с лабораторией теории и проектирования больших систем и базовой кафедрой проектирования и организации систем факультета управления и прикладной математики (ФУПМ) Московского физико-технического института. Кафедра была образована на базе лаборатории в том же 1969 г., когда в физтехе по инициативе академиков А.А. Дородницына, О.М. Белоцерковского, В.М. Глушкова, А.А. Самарского и член-корреспондентов Н.Н. Моисеева и Д.Е. Охоцимского часть тогдашнего факультета аэромеханики была преобразована в новый факультет — ФУПМ. В результате этого преобразования в ВЦ вместо одной базовой кафедры аэромеха (группа 38), возглавляемой тогдашним директором ВЦ академиком А.А. Дородницыным, возникло три базовых кафедры: А.А. Дородницына (математическая физика), Н.Н. Моисеева (исследование операций) и уже упомянутая кафедра Г.С. Поспелова.

Первыми попали на эту кафедру четверокурсники бывшего аэромеха, будущие сотрудники лаборатории Галина Орлова, Любовь Крылатых, Светлана Палилова; на следующий год — Людмила Литвинцева, Сергей Дулин, Павел Литвинцев, Вера Курскова, Людмила Иванова. В дальнейшем кафедра подготовила для работы в лаборатории таких специалистов, как Леонид Хачиян, Михаил Козлов, Константин Фролов, Олег Смирнов, Игорь Литвинчев, Сергей Родин, Алексей Акимов, Андрей Швалева, Дмитрий Маслов, Артем Терентьев, Дмитрий Христьяновский. Если учесть, что преподавали тогда на кафедре недавние выпускники физтеха Виктор Вен, Виктор Шафранский, Игорь Шахнов и Александр Эрлих, — можно сказать, что лаборатория практически выросла “на плечах” физтеха.

Первоначально в лаборатории было три сектора, которыми руководили Г.С. Поспелов, Д.А. Поспелов и В.М. Солодов (1935–1998). Все они преподавали в МФТИ (В.М. Солодов на кафедре высшей математики, а двое других на кафедре проектирования и организации систем) и имели возможность отбирать лучших студентов и аспирантов для формирования состава лаборатории. Вот почему в лаборатории достаточно быстро оказалось много сильных молодых специалистов, которые сразу же включались в научные исследования по тематике лаборатории и быстро защищали кандидатские диссертации.

Исследования в области управления большими производственно-экономическими системами были начаты Г.С. Поспеловым в связи с тем, что в АН СССР и АН союзных республик с середины 60-х гг. развернулись работы по математическим методам исследования операций, экономико-математическому моделированию и теории больших систем. Под руководством Г.С. Поспелова и при его непосредственном участии в лаборатории теории и проектирования больших систем были разработаны модели и процедуры программно-целевого планирования развития как отдельных отраслей машиностроительного и приборостроительного типа, так и комплекса таких отраслей [3–5]. В 1972 г. его первым в ВЦ ученикам-сотрудникам, тогда совсем молодым кандидатам наук В. Вону, В. Шафранскому и А. Эрлиху за цикл исследований, связанных с разработкой экономико-математических моделей программного планирования, была присуждена Премия Ленинского комсомола СССР.

В последние годы перед развалом СССР под научным руководством Г.С. Поспелова коллективом разработчиков, возглавляемым доктором технических наук В.М. Солодовым, были реализованы диалоговые системы перспективного планирования развития отраслей и комплексов отраслей промышленности: система МОНОЛИТ (разработка ВЦ АН СССР и институтов Миноборонпрома), система ГРАНИТ (ВЦ АН СССР и Минрадиопром), ДИСФОРП (ВЦ АН СССР и Минмаш), отмеченные постановлениями Совмина СССР, Президиума АН СССР и медалями ВДНХ.

С середины 70-х гг. и сам Гермоген Сергеевич и значительная часть лаборатории плотно включились в исследования в области искусственного интеллекта и интеллектуальных прикладных систем. Это новое научное направление, в становление которого вклад Г.С. Поспелова трудно переоценить, определило последний период его жизни и научной деятельности. Гермоген Сергеевич четко понимал важность исследований в этой научной области для развития новейших информационных технологий [6]. Даже простой перечень направлений исследований в возглавляемой им лаборатории: интеллектуальные диалоговые системы, интеллектуальные решатели и планировщики, экспертные системы, интегрированные интеллектуальные системы, которые постоянно находились в сфере его научных интересов и были предметом большой научно-организационной работы, — свидетельствует об этом.

Влияние Г.С. Поспелова на становление этого научного направления распространялось далеко за пределы лаборатории. Будучи заместителем председателя Координационного комитета АН СССР по вычислительной технике, членом Комитета по системному анализу при Президиуме АН СССР и председателем Совета по искусственному интеллекту этого комитета, Гермоген Сергеевич, опираясь на научный потенциал лаборатории, способствовал развитию исследований в области искусственного интеллекта в институтах АН СССР и союзных республик, в высшей школе, в научных учреждениях Министерства обороны и оборонных отраслей промышленности. Эта его деятельность в значительной мере обусловила создание в 1989 г. Советской ассоциации искусственного интеллекта, первым президентом которой был единогласно избран Гермоген Сергеевич. В Научный совет ассоциации было избрано несколько сотрудников лаборатории, а председателем совета стал Д.А. Поспелов, который впоследствии сменил Г.С. Поспелова на посту Президента ассоциации и долгие годы ее возглавлял.

Со второй половины 70-х гг. развивалось и международное сотрудничество лаборатории Г.С. Поспелова в области искусственного интеллекта. Сотрудники лаборатории составляли костяк возглавляемой Гермогеном Сергеевичем международной рабочей группы РГ-18 по проблеме “Искусственный Интеллект”, активно и плодотворно работавшей в составе Проблемной комиссии многостороннего сотрудничества академий наук социалистических стран “Научные вопросы вычислительной техники” (КНВВТ).

К середине 80-х гг. лаборатория, возглавляемая Г.С. Поспеловым, по составу сотрудников вполне могла претендовать на роль Диссертационного совета по направлениям, связанным с исследованиями в области искусственного интеллекта, построением экономико-математических моделей производства, разработкой диалоговых систем долгосрочного планирования, расчетно-логических систем и систем принятия решений.

К этому времени уже успешно защитили докторские диссертации В.В. Шафранский, В.М. Солодов, Л.Г. Хачиян, А.И. Эрлих, В.Л. Вен и В.И. Цурков. Позднее докторами наук отдела интеллектуальных прикладных систем ВЦ РАН стали С.К. Дулин и В.Ф. Хорошевский.

После того как в 1988 г. академик Г.С. Поспелов в соответствии с правилами АН СССР, определявшими возрастную ценз для занятия административных должностей, оставил руководство отделом и перешел в советники директора ВЦ,



*Г.С. Поспелов и Ф.В. Хорошевский  
на заседании РГ-18 КНВВТ в Берлине*



его отдел разделился на два отдела. Один из них, отдел проблем искусственного интеллекта, возглавил Д.А. Поспелов, а другой, отдел интеллектуальных прикладных систем, — В.М. Солодов\*.

Следует отметить, что ключевые исследования лаборатории по тематике искусственного интеллекта развивались в секторе, который много лет возглавлял доктор технических наук, профессор Дмитрий Александрович Поспелов, который пришел в лабораторию из МЭИ в начале 1970 г. по приглашению Г.С. Поспелова.

Д.А. Поспелов один из ведущих отечественных специалистов в области новых методов управления сложными системами, ЭВМ новой архитектуры и проблем искусственного интеллекта. Он автор 20 монографий и более 150 статей. Наиболее известны из них: монография [7], которая в течение ряда лет использовалась в качестве учебника в ВУЗах страны для студентов, специализирующихся в области вычислительной техники; монография [8], в которой были впервые сформулированы модели, лежащие в основе метода ситуационного управления большими системами, теория которого изложена в монографии [9]; монография [10], в которой изложены принципы построения интеллектуальных систем проектирования и управления и др.

В процессе научной деятельности Д.А. Поспеловым созданы методы управления сложными системами, для которых нет возможности строить модель управления традиционными методами классической теории управления. В основе комплекса методов, развитых Д.А. Поспеловым, его учениками и последователями, лежит идея семиотических (логико-лингвистических) моделей представления объекта управления и описания процедур управления ими. Идеи, положенные в основу таких методов еще в конце 60-х гг., на полтора десятка лет опередили аналогичные идеи, которые вновь возродились в работах по искусственному интеллекту и интеллектуальным системам. В СССР еще в 70-х гг. с помощью методов ситуационного управления и семиотического моделирования были созданы эффективные модели оперативного диспетчерского управления такими объектами, как грузовой морской и рыбный порты, автокомбинат, трубопроводный транспорт, а также рядом специальных объектов. Методы этого типа и до настоящего времени находят широкое применение в области создания модулей управления сложными техническими и организационными объектами.

Не менее важны исследования Д.А. Поспелова по созданию комплекса специальных логических моделей, позволяющих отображать в памяти технической системы весь набор необходимых знаний о фундаментальных связях между явлениями окружающей среды. Эти модели получили название псевдофизических логик. Среди них временная, пространственная и причинно-следственные логики, а также логики целей и действий. Подобные модели лежат в основе планирования целесообразной деятельности робототехнических систем, а также систем понимания естественно-языковых текстов. В 1987 г. вышла коллективная монография [11], в которой эти исследования получили завершенное представление. Одновременно эта монография была издана на английском языке.

Аппарат ярусно-параллельных форм, разработанный Д.А. Поспеловым, позволил поставить и решить многие проблемы, связанные с организацией параллельных вычислений в вычислительных комплексах и сетях. Этот аппарат стал классическим и его описание входит во все учебные пособия и учебники по вычислительным системам. На его основе в 60–70-е гг. были решены такие проблемы, как синхронное и асинхронное распределение программ по машинам системы, проблема оптимальной сегментации программ и оптимизационные задачи, связанные с распределением информационных обменов. В настоящее время развитие методов этой группы привело к созданию новых концепций для спецпроцессоров баз знаний и логического вывода, использующих в качестве модели представления знаний семантические сети или фреймы.

Д.А. Поспеловым заложены основы нового научного направления, относящегося к инженерии знаний, моделированию рассуждений специалистов-экспертов, принимающих решения в различных предметных областях. Им создана теория нечетких квантификаторов, которая позволила ряду специалистов построить модели человеческих рассуждений, учитывающих те или иные “не-факторы”, свойственные мышлению специалистов (нечеткость, неполнота,

---

\* Несколько позже из отдела интеллектуальных прикладных систем выделился еще один отдел, отдел информационных систем, который возглавил В.Л. Вен. Позднее, после отъезда В.Л. Вена в США, этот отдел был переименован в отдел больших систем, и его возглавил д.ф.-м.н. В.И. Цурков.

недетерминированность, неточность и т.п.). Это позволило приблизить модели классических рассуждений, изучаемых в традиционной логике, к моделям рассуждений, которыми пользуются специалисты. В свою очередь, это дало возможность создавать в экспертных и других интеллектуальных системах блоки общения, объяснения и принятия решений, работающие более эффективно, чем те, которые основывались на моделях типа исчисления предикатов или традиционной силлогистики. В 1988 г. вышла монография [12], в которой были приведены первые итоги развития работ в этом направлении в нашей стране.

В 80-е гг. Д.А. Поспелов внес большой вклад в развитие международного научного сотрудничества в рамках существовавшего тогда Совета экономической взаимопомощи стран социалистического лагеря. Он руководил двумя международными проектами по созданию прототипов ЭВМ новых поколений. В рамках проекта ЛИВС (Логическая информационно-вычислительная система), выполнявшегося рядом организаций АН СССР (ВЦ АН СССР, ИК АН УССР, ИК АН ГССР, ФТИ АН СССР, ВИНТИ АН СССР, ВЦ СО АН СССР, ИНС АН СССР) и организацией САМАЛК Венгерской народной республики, был создан опытный образец ЭВМ, которая обладала повышенными возможностями по обработке сложно структурированных знаний, осуществляла эффективный и правдоподобный вывод и играла роль настраиваемой на широкий круг проблемных областей экспертной системы. Проект ПАМИР (Параллельная Архитектура, Микроэлектроника, Интеллектуальный Решатель), в выполнении которого участвовали ВЦ АН СССР, ИПС АН СССР, ИК АН УССР совместно



*Й. Буссе, В.Ф. Хорошевский,  
Е.Ю. Кондрашина и Д.А. Поспелов  
(заседание РГ-22 в г. Сувалки, ПНР)*

с Международной базовой лабораторией по искусственному интеллекту АН социалистических стран в Братиславе и Институтом технической кибернетики Словацкой АН, был ориентирован на исследования возможностей новой архитектуры (однородная среда из микропроцессоров, на которой реализуются “волновые” процессы обработки информации) для создания на этой основе высокоэффективных спецпроцессоров баз знаний, интеллектуальных решателей и систем общения на основе речевого ввода-вывода.

Под его руководством в составе Проблемной комиссии многостороннего сотрудничества АН соцстран “Научные вопросы вычислительной техники” (КНВВТ) активно работала международная группа РГ-22 по проблеме “Искусственный интеллект”, которая продолжила традиции упоминавшейся уже РГ-18 и сыграла

важную роль как в развитии этого направления, так и в объединении специалистов из разных стран.

Нельзя не отметить вклад Д.А. Поспелова в популяризацию новых научных идей, как среди специалистов, так и среди широкого круга лиц, интересующихся развитием науки в нашей стране. Две его популярные книги [13, 14] отмечены дипломами на Всесоюзных конкурсах общества “Знание”.

Значительна роль профессора Д.А. Поспелова в подготовке высококвалифицированных научных кадров. Под его руководством выполнена и успешно защищена почти сотня кандидатских и докторских диссертаций (в том числе зарубежными соискателями).

В секторе, а затем и в отделе Д.А. Поспелова успешно работали многие талантливые ученые. Одним из них был Е.И. Ефимов (1931–1995), который пришел в ВЦ АН СССР из одного из головных институтов Генштаба Министерства обороны СССР. В сфере его научных интересов были проблемы создания логических моделей мышления и рассуждений, описанные в монографии [15], вышедшей в серии “Проблемы искусственного интеллекта” в 1982 г. Особое место в исследованиях по моделированию творческого мышления принадлежит Р.Х. Зарипову, который много лет посвятил разработке музыкальных программ. Долгие годы

в лаборатории Г.С. Поспелова, а затем и в отделе Д.А. Поспелова работал канд. техн. наук, доцент В.Н. Захаров, который в последние годы (умер 08.09.2005 г.) заведовал сектором интеллектуальных управляющих систем в отделе В.И. Цуркова. Деятельность В.Н. Захарова была связана с исследованием задач управления интеллектуальными системами, им разработаны математические модели сложных систем управления на базе современных информационных технологий, ориентированных на решение задач управления плохо формализуемыми объектами и процессами.

В конце 80-х – 90-х гг. отдел Д.А. Поспелова был одним из ведущих коллективов в области искусственного интеллекта в российской науке.

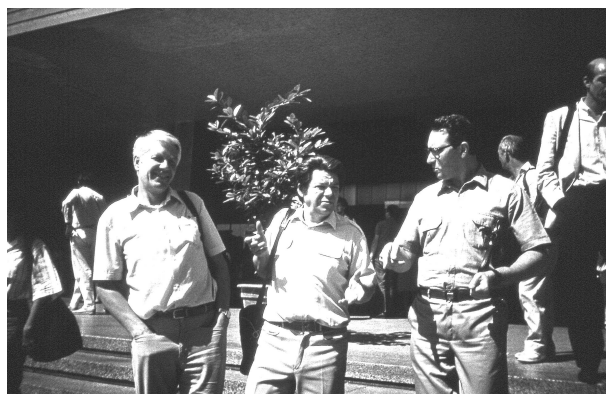
Проводимые в отделе исследования были направлены на развитие теоретических основ построения систем, основанных на знаниях, новых технологий разработки и реализации интеллектуальных систем, программного обеспечения систем искусственного интеллекта (ИИ).

Работы в области теоретических основ построения систем, основанных на знаниях, проводились под непосредственным руководством и при самом активном участии Д.А. Поспелова. Эти работы концентрировались вокруг создания моделей дискурса, поддерживающих кооперативный диалог пользователя с интеллектуальной системой, включали разработку подсистем объяснения и аргументации решений, создание языков и систем представления знаний для проектирования баз знаний интеллектуальных систем нового поколения.

Основной аппарат, используемый здесь, — теория фреймов и продукционных систем, с одной стороны, и расширенный аппарат процедур-демонов, с другой. На базе объединения этих аппаратов сектором, возглавляемым В.Ф. Хорошевским (в то время еще кандидатом наук) были созданы семейства систем представления знаний различного уровня, а также окружение редактирования, компиляции и отладки таких баз знаний.

В секторе к.ф.-м.н. А.Н. Аверкина были разработаны семейства fuzzy-логик, задание которых осуществляется с помощью системы треугольных норм, зависящих от различных параметров. Варьирование этих параметров позволяет изменять логику вывода решения в пределе на каждом шаге, что повышает мощность соответствующей машины вывода. Были разработаны также методы вероятностного моделирования нечетких баз знаний деревьев вывода решений, что обеспечивало диалоговое проектирование машин вывода для экспертных систем.

В те годы сотрудники отдела принимали активное участие в организации и проведении конференций и симпозиумов по тематике искусственного интеллекта как у нас в стране, так и за рубежом. Достаточно отметить, что в 80-х гг. ими было проведено более 20 всесоюзных симпозиумов и конференций по кибернетике, компьютерной лингвистике, искусственному интеллекту и смежным вопросам. За семь лет существования международных рабочих групп КНВВТ РГ-18 и РГ-22 было проведено 15 заседаний, каждое из которых сопровождалось мини-конференцией по тематике представления и обработки знаний. Ведущие специалисты отдела выступали с докладами на международных конференциях по ИИ, неоднократно участвовали в Программных комитетах международных конференций этого направления.



*Э.Х. Тыугу, Д.А. Поспелов и В.В. Шафранский  
(Всемирная конференция по искусственному  
интеллекту в Милане)*

Отдел интеллектуальных прикладных систем, который возглавил В.М. Солодов, унаследовал от лаборатории Г.С. Поспелова всю тематику, связанную с созданием систем прикладного назначения. В.М. Солодов (1931–1998) был замечательным ученым и талантливым руководителем. На его долю заведующего отделом интеллектуальных прикладных систем выпало очень трудное время перехода России к рыночным реформам, нанесшего заметный урон отечественной науке. Тем не менее ему удалось сохранить научный потенциал отдела. К величайшему сожалению, он рано ушел из жизни, и до сих пор его коллеги переживают эту тяжелую утрату.



*В.М. Солодов*

В отдел В.М. Солодова без каких-либо изменений вошли три сектора бывшей лаборатории теории и проектирования больших систем — сектора, которыми руководили сам В.М. Солодов, В.В. Шафранский и А.И. Эрлих, сохранившие свои направления исследований и разработок.

Сектор В.М. Солодова был нацелен на создание автоматизированной диалоговой системы “Гранит”, предназначенной для комплексного планирования развития отдельной отрасли и комплекса отраслей промышленности машиностроительного типа. Система “Гранит” позволяла разрабатывать сбалансированный по трудовым, материальным и финансовым ресурсам проект плана развития комплекса отраслей и каждой входящей в комплекс отрасли с детализацией до производственного объединения и предприятия. По тем временам это была выдающаяся разработка, основанная на принципиально новой техно-

логии работы сотрудников плановых органов, — коллективный диалоговый процесс разработки сбалансированного и согласованного проекта плана (коллективное согласованное принятие решений с использованием ЭВМ). Проект создания системы “Гранит”, которым руководил В.М. Солодов, осуществлялся в кооперации с одной из головных организаций Минрадиопрома СССР — Научно-исследовательским информационным центром систем управления ЦНПО “Экор”. АДСКП “Гранит” была внедрена в составе подсистемы “Радиопромышленность” АСПР Госплана СССР, первой очереди отраслевого банка технико-экономической информации Минрадиопрома СССР, на рязанском ПО “Красное знамя”, в составе АСПР Госплана Грузинской ССР, в учебном процессе в Академии народного хозяйства при Совмине СССР.

Сектор В.В. Шафранского продолжил начатые еще в конце 70-х гг. работы в области развития методов и средств проектирования систем управления гибкими производственными системами. Работы проводились в кооперации с одним из головных институтов Министерства машиностроения СССР — ЦНИИ систем управления (г. Тула). Первоначально предполагалось использовать результаты этих разработок на заводах Минмаша. К началу 90-х гг. в секторе была завершена разработка пилотной версии интеллектуальной системы моделирования, проектирования и планирования работы автоматизированных производственных комплексов — системы АМИГО, основные подсистемы которой по частям прошли успешную апробацию на производстве. Однако внедрение системы в целом не произошло из-за начавшегося развала отечественной промышленности. Когда профессор В.В. Шафранский перешел на преподавательскую работу в Академию народного хозяйства при Правительстве России, исследования и разработки по этой тематике в отделе интеллектуальных прикладных систем вскоре прекратились.

В секторе А.И. Эрлиха продолжались начатые по инициативе Г.С. Поспелова в конце 70-х гг. исследования в области информационных технологий автоматизации инженерных расчетов и поддержки принятия решений в проектировании технических систем. Но об этом несколько ниже, так как этот сектор, возникнув еще в лаборатории Г.С. Поспелова, сохранился и до сегодняшнего дня в отделе интеллектуальных прикладных систем.

После смерти В.М. Солодова его отдел возглавил доктор технических наук, профессор С.К. Дулин — один из ведущих советских (российских) ученых в области представления знаний в системах искусственного интеллекта. Его исследования связаны с проектированием и совершенствованием баз данных и знаний широкого профиля, разработкой систем поддержки данных и знаний, позволяющих на базе современных ЭВМ выявлять, накапливать и корректировать знания из различных предметных областей, а также автоматизировать сопровождение системы знаний. В последнее время он возглавил направление исследований и разработок в области поддержки согласованности активных систем знаний интеллектуальными диалоговыми средствами, что позволяет существенно расширить возможности информационного моделирования сложных динамических объектов.

Фундаментальные и прикладные исследования и разработки С.К. Дулина известны широкому кругу специалистов по представлению знаний. За цикл работ по поддержке согласованности в базах данных и знаний [16, 17] С.К. Дулину в 1992 г. была присуждена первая премия

Российской ассоциации искусственного интеллекта за лучшую фундаментальную работу по искусственному интеллекту.

Спустя некоторое время, когда Д.А. Поспелову из-за болезни стало трудно руководить своим отделом, его отдел и отдел С.К. Дулина были слиты в один, сохранивший название отдел интеллектуальных прикладных систем, который возглавил С.К. Дулин. Сегодня после перехода С.К. Дулина на постоянную работу в другую организацию отдел интеллектуальных прикладных систем возглавляет доктор технических наук, профессор В.Ф. Хорошевский — один из известных в нашей стране и за рубежом ученых в области программного обеспечения систем искусственного интеллекта. Им выполнено 130 научных работ, из которых опубликовано более 100, в том числе монография [18], рекомендованная в качестве учебника для студентов и аспирантов соответствующих специальностей.

В научной деятельности В.Ф. Хорошевского можно выделить следующие основные направления: исследования в области метаязыкового подхода к автоматизации проектирования трансляторов с различных алгоритмических языков; работы в области создания специализированных средств представления лингвистических знаний для реализации прикладных естественно-языковых систем; исследования в области создания интеллектуальных средств автоматизации проектирования и реализации экспертных систем и технологии использования таких средств, а также исследования в области создания пространств знаний в среде Интернет.

Наряду с научными исследованиями и разработками В.Ф. Хорошевский ведет серьезную научно-организационную работу. Он неоднократно участвовал и участвует в качестве члена Программного комитета в различных международных конференциях по тематике ИИ, рецензирует доклады, представленные на всемирные конференции по ИИ; один из основных организаторов всех научных конференций национальной ассоциации по искусственному интеллекту, член Научного совета РАИИ. В 1980–1988 гг. он был ученым секретарем международных рабочих групп РГ-18 и РГ-22 академий наук социалистических стран по тематике искусственного интеллекта. В 1998–99 гг. В.Ф. Хорошевский получал стипендию Президента России, как выдающийся ученый.

В составе отдела в настоящее время три сектора:

- математических основ искусственного интеллекта (руководитель — к.ф.-м.н. А.Н. Аверкин);
- прикладных интеллектуальных систем (руководитель — д.т.н. А.И. Эрлих);
- инструментальных средств для искусственного интеллекта (руководитель — д.т.н. В.Ф. Хорошевский).

Новые условия существования отдела определили несколько базовых направлений, в которых продолжаются исследования в области искусственного интеллекта. Это — фундаментальные исследования по разработке структур данных и знаний, концептуальных схем и принципов реализации интеллектуальных систем, обеспечивающих поддержку решения многоплановых прикладных проблем на основе интеграции знаний различных научных дисциплин и разнородных моделей; разработка методов и средств создания интегрированных интеллектуальных систем, ориентированных на решение задач в рамках интеграции содержательно-описательных и формально-математических моделей и методов; разработка и программная реализация на ЭВМ диалоговых интегрированных экспертных систем поддержки принятия решений в различных сферах деятельности, в том числе в процессах формирования программ развития и целевого управления.

Сектор А.Н. Аверкина был образован еще в 1988 гг. в составе отдела Д.А. Поспелова. В течение последних пяти лет сектор ведет госбюджетную тему “Теоретические проблемы построения систем, основанных на знаниях, и их программно-аппаратная поддержка”, содержание которой отражает следующие тенденции построения интеллектуальных систем: отказ от



*С.К. Дулин*



*В.Ф. Хорошевский*

жестких схем рассуждений, опирающихся на дедуктивную процедуру (в 80-е гг. в ИИ исследовались замкнутые формальные системы, моделирующие предметные области, о закономерностях которых априорно известно все, но к началу 90-х гг. внимание исследователей переключается на изучение квазиаксиоматических систем, в которых аксиомы частично являются сменными, что позволяет использовать правдоподобный вывод и правдоподобную аргументацию); использование идей прикладной семиотики для построения семантических баз знаний, что позволяет сделать принципиальный шаг по пути приближения когнитивных структур в базах знаний к тем структурам, которыми пользуется мышление человека; использование в робототехнике моделей мира, основанных на логике действий и других псевдофизических логиках; комплексное развитие и использование нечеткой математики вместе с обобщенными нейронными сетями и генетическими алгоритмами.

Среди основных теоретических результатов сектора можно отметить работы ст. научн. сотр., к.ф.-м.н. Н.М. Нагорного, получившего новое доказательство непротиворечивости классического логико-арифметического исчисления, основанное на модификации введенного С.К. Клини понятия реализуемой логико-арифметической формулы. Им также конкретизирована знаменитая теорема Маркова о распознавании нетривиальных инвариантных (т.н. "марковских") свойств конечноопределенных полугрупп. Для некоторых из этих свойств доказано, что они, будучи перечислимыми, неразрешимы. Результаты опубликованы во втором, существенно расширенном и переработанном издании монографии [19]. Первое издание этой книги в 1988 г. было переведено на английский язык.

Интересны результаты ст. научн. сотр., д.ф.-м.н. Нгуена Минь Хая по созданию нечеткозначной вероятностной логики, обобщающей вероятностную логику Нильса Нильсона, в которой вероятность события является суммой вероятностей появления этого события в некотором множестве возможных миров. Этому результату была посвящена его докторская диссертация.

Работы ст. научн. сотр. С.А. Орловского по созданию аксиоматической теории нечетких множеств на языке непредикативных свойств отражены в монографии [20].

Заведующий сектором А.Н. Аверкин активно работает над созданием основных принципов нового интегрированного направления мягких измерений, объединяющего общие вопросы теории и практических приложений мягких вычислений и интеллектуальных измерений в условиях значительной неопределенности информации о сложных техногенных и природных системах. По результатам этих исследований опубликована монография [21], переведенная на английский язык. Важными прикладными результатами являются алгоритмы нечеткого вывода на основе логик из параметрического семейства логик с возможностью их настройки на логику пользователя и реализованные на их основе программные модули, разработанные под руководством заведующего сектором А.Н. Аверкина. Эти алгоритмы использованы в системах прогнозирования поддержки принятия решений в задачах природопользования, экологической безопасности, управления сложными техногенными комплексами в составе информационных комплексов "Экоаналитик". Соответствующие программные модули демонстрировались на международных выставках SIMO-97, SIMO-98, CeBit-98.

Среди других прикладных разработок, выполненных в секторе, следует отметить математические и программные средства для решения задачи раннего распознавания скакового класса лошадей по признакам экстерьера, Информационно-поисковую систему "КОНИ", предназначенную для племенного учета в российском коневодстве и систему "BLOODTYPE" для подтверждения происхождения лошадей по данным анализов их крови. Эти разработки проводились совместно с Всероссийским научно-исследовательским институтом коневодства РАСХН под руководством С.А. Орловского.

В области создания программно-аппаратных средств для систем, основанных на знаниях, разработана программная оболочка нечеткого вывода, позволяющая менять логику вывода в процессе управления. Для ее аппаратной поддержки разработан прототип первого в мире оптоэлектронного нечеткого регулятора VAMPIR. В этом устройстве используются алгоритмы нечеткого вывода на основе логик из параметрического семейства с возможностью их настройки на логику пользователя. В апреле 1999 г. на это устройство получен патент. В настоящее время проводится сравнение эффективности работы прототипа с серийными нечеткими регуляторами фирмы SGS-THOMPSON Microelectronics.

Сектор прикладных интеллектуальных систем, возглавляемый д.т.н., профессором А.И. Эрлихом, имеет давнюю историю, берущую свое начало еще от лаборатории Г.С. Поспелова, в которой Александр Игоревич работал с самого ее возникновения.

А.И. Эрлих, выпускник МФТИ 1967 г., — один из ведущих отечественных специалистов в области развития и применения информационных технологий, автор более 60 научных работ и монографий. Первые 10 лет работы под непосредственным научным руководством Г.С. Поспелова были посвящены исследованиям в области информационных технологий автоматизации планирования и управления большими производственно-экономическими системами, разработке принципов и математических моделей программно-целевого планирования и управления народным хозяйством. Результаты, полученные А.И. Эрлихом в рамках этого направления, вошли важной составной частью в концепцию, принципы и механизмы программно-целевого планирования и управления развивающимся народным хозяйством.

В конце 70-х гг. по поручению Г.С. Поспелова А.И. Эрлих возглавил в лаборатории исследования в области информационных технологий автоматизации инженерных расчетов и поддержки принятия решений в проектировании технических систем. Тогда же был образован возглавляемый им сектор.

А.И. Эрлих со своими учениками, недавними в то время выпускниками кафедры проектирования и организации систем А. Швалевым и С. Родиным (несколько позже к ним присоединились И. Румянцев, А. Азнаурян и Д. Христьяновский) разработали концепцию, архитектуру, принципы и методы реализации интеллектуальных систем автоматизации моделирования, анализа функционирования и параметрического синтеза сложных технических объектов в процессе их проектирования. В рамках этого направления А.И. Эрлихом было сформулировано, теоретически обосновано и практически развито новое направление исследований и разработок в области создания интеллектуальных прикладных систем. Под научным руководством А.И. Эрлиха и при его непосредственном участии коллективом сотрудников сектора был выполнен ряд исследований и разработок по созданию диалоговых систем, нашедших практическое применение в проектировании новых образцов вооружения и военной техники.

Наибольшую известность получила интеллектуальная система моделирования альтернатив и выбора решений (МАВР), предназначенная для блочно-модульного проектирования технических систем. Система МАВР была реализованная на ЭВМ БЭСМ6 (впоследствии — на СМ-4) и архитектурно включала три уровня: прикладной, математический и программный со специально организованными базами знаний на каждом уровне, наполнение которых осуществлялось при настройке системы на конкретную предметную область. Реализованный в системе МАВР оригинальный механизм переформулирования позволял проектировщику описывать проектируемый объект на привычном для него языке технических спецификаций и ставить в этом контексте разнообразные расчетные задачи, а соответствующие программы решения таких задач синтезировались в системе автоматически. К середине 80-х гг. система МАВР по заказу ряда отраслей оборонной промышленности была настроена на несколько предметных областей, после чего началась ее опытная эксплуатация, показавшая высокую эффективность этой системы. Так, система МАВР, настроенная на предметную область “Воздушные системы обеспечения температурно-влажностных режимов”, позволяла одному инженеру-теплотехнику выполнить, например, эскизный проект двухконтурной турбовоздушной холодильной установки, состоящей из 12 агрегатов, вместе с их конструктивным расчетом, за 8–10 часов терминального времени БЭСМ-6 вместо обычных 1600÷3800 человеко-часов группы проектировщиков из 10–12 человек.

Все ученики А.И. Эрлиха, участвовавшие в исследованиях и разработках по этой тематике, к 1984 г. защитили кандидатские диссертации, а сам А.И. Эрлих — докторскую. В 1986 г. за участие в разработке и внедрении многоцелевых программных средств в инженерные расчеты и



А.И. Эрлих

проектирование сложных технических объектов на ЭВМ ему была присуждена премия Совета Министров СССР в области науки и техники.

В последние годы работы возглавляемого А.И. Эрлихом сектора посвящены исследованиям в области проектирования и управления эксплуатацией и развитием корпоративных информационно-технологических систем управления информацией. В основном эти исследования ориентированы на разработку принципов, методов и технологии создания распределенных автоматизированных интеллектуальных систем для таких слабоструктурируемых областей, как управление сложными организационно-техническими объектами, дистанционное обучение, телемедицина.

Учеником и сотрудником А.И. Эрлиха к.ф.-м.н. С.Р. Родиным разработана новая информационная технология в организации лечебного процесса, реализованная в системе МЕДИС, предназначенной для автоматизации сбора, хранения и обработки информации о лечебном процессе в медицинских учреждениях различного профиля с использованием локальных информационно-вычислительных сетей. Это машинно-ориентированная технология является основой для включения в лечебный процесс новых современных подходов, связанных с использованием целого спектра экспертных систем.

Результаты, полученные А.И. Эрлихом и его сотрудниками в рамках этого направления, нашли, в частности, свое практическое применение в крупном межведомственном проекте разработки и реализации телемедицинской системы для “медицины катастроф”, которая в 2002–2003 гг. позволила обеспечить оказание экстренных консультаций высококвалифицированных специалистов центральных клиник врачам полевого педиатрического госпиталя в Чеченской Республике.

Несколько особняком от основного русла работ сектора стоят проводимые к.ф.-м.н. Н.Н. Поповым исследования по разработке нестандартных алгоритмов решений эволюционных уравнений параболического типа на основе использования метода сингулярных потенциалов. Разрабатывается линеаризованный метод нахождения стационарных переходных квантовых вероятностей для квантовых систем с конечным числом состояний, суть которого заключается в переходе от рассмотрения системы линейных дифференциальных уравнений 1-го порядка с коэффициентами, зависящими от параметра, к системе с постоянными коэффициентами. Получен аналог уравнения Эйнштейна для случая шестимерных пространств с абсолютным параллелизмом.

Профессор А.И. Эрлих с аспирантских времен ведет большую работу по подготовке и повышению квалификации научных кадров. В МФТИ он прошел путь от ассистента до профессора. Практически все время существования кафедры проектирования и организации систем А.И. Эрлих был заместителем заведующего кафедрой Г.С. Поспелова. Сегодня, после ряда слияний и делений базовых кафедр ФУПМ в ВЦ РАН, профессор А.И. Эрлих организует учебный процесс и руководит специализацией “проектирование и организация систем” на базовой кафедре “Интеллектуальные системы”, возглавляемой чл.-корр. РАН К.В. Рудаковым. Подготовку студентов по этой специализации, как и раньше на кафедре Г.С. Поспелова, осуществляют профессор, доктор наук С.К. Дулин, В.Ф. Хорошевский, В.И. Цурков, доцент, кандидат наук И.Ф. Шахнов и до самого последнего времени доцент, кандидат наук В.Н. Захаров. Большинство выпускников кафедры проектирования и организации систем стали высококвалифицированными специалистами и успешно работают в России, в ближнем и дальнем зарубежье.

Сектор инструментальных средств для искусственного интеллекта под руководством В.Ф. Хорошевского тоже был образован в 1988 г. в составе отдела Д.А. Поспелова. В настоящее время основные направления работы сектора в области внедрения интеллектуальных диалоговых средств и структурного анализа данных и знаний связаны с разработкой комплекса инструментальных средств организации диалога пользователя с произвольным уровнем подготовки на основе динамических схем диалога; комплекса инструментальных средств управления информационными моделями; исследованием подходов к построению семантических моделей слабо формализуемых предметных областей; созданием механизмов управления структурной согласованностью и реализацией специальных средств поддержки контролируемого уровня согласованности компонентов данных и знаний, представленных в виде информационных моделей на ЭВМ.



В этой области получены как теоретические, так и прикладные результаты, реализованные в виде интеллектуальных диалоговых средств поддержки контролируемого уровня рассогласованности, в частности системы DISSON (реализует алгоритмы выявления и уменьшения рассогласованности в базе данных); RESTRUCTOR (реализует алгоритмы выявления и уменьшения рассогласованности в структурах взаимосвязанных объектов, которые могут находиться в разных системах знаний и поддерживаться различными средствами управления), которая обладает собственными средствами генерации и наращивания системы знаний непосредственно самим пользователем; RESONANCE (функционирует в среде Windows, реализует алгоритмы выявления и уменьшения рассогласованности в структурах взаимосвязанных объектов, которые формируются пользователем из различных документальных баз данных, включая CD-ROM носители и Интернет). Особый интерес представляет система INTELLEDGER (Интеллектуальный информационный обработчик) — программное средство, предназначенное для решения задач аналитической обработки информационных массивов, представленных в виде текстовых данных, когда имеется необходимость проблемно-ориентированной классификации информации. Ядром системы является интерактивный алгоритм поиска согласованной структуры множества взаимосвязанных объектов, каждый из которых представляет собой слабо формализованные и неструктурированные данные. Система ориентирована на обработку преимущественно англоязычных текстов, представленных в формате HTML-документов или обычных (ASCII)-файлов и реализована на платформе Java<sup>TM</sup>2 в виде интерактивной программы, позволяющей пользователю создавать и сопровождать проекты — динамические обновляемые массивы текстовых документов. Разработана, реализована и находится в эксплуатации “Инструментальная среда разработки сложных программных комплексов”. В ее состав входит многооконная подсистема организации диалога; транслятор описания электронных бланков; оригинальная СУБД сетевого типа; эмулятор работы локальной сети; система генерации отчетов; текстовый редактор и др.

Еще одно направление работ сектора, выполняемых под руководством и при непосредственном участии В.Ф. Хорошевского, связано с исследованиями по представлению знаний в среде Интернет (Semantic Web). При этом основное внимание уделяется мультиагентным технологиям и созданию интеллектуального инструментария для мультиагентных систем, проектированию систем интеллектуального поиска информации в сети Интернет, а также разработке и реализации методов и систем представления знаний на основе онтологий, созданию специальных средств представления и обработки лингвистических знаний, а также исследованию методов извлечения знаний из естественно-языковых текстов под управлением онтологий предметных областей.

В настоящее время в отделе интеллектуальных прикладных систем работает много известных ученых и специалистов. Однако особое место среди них занимает уже упоминавшийся к.ф.-м.н. Н.М. Нагорный — один из ярчайших российских ученых школы А.А. Маркова. Будучи одним из первых учеников А.А. Маркова, он на раннем этапе формирования информатики включился в разработку теоретико-алгоритмической и математико-логической проблематики, которая со временем превратилась в серьезный источник идей для теоретических разделов этой науки. Специализируясь главным образом в области теории алгоритмов и конструктивной семантики, он тем не менее затронул в своей научной деятельности широкий спектр проблем — от чисто математических до инженерных и философских. В исследованиях по теории алгоритмов Н.М. Нагорный включился в период создания Марковым его классической монографии “Теория алгорифмов” (1954 г.). Именно тогда в ней и появилась “теорема Нагорного”, вошедшая затем во многие отечественные и зарубежные работы по теории алгоритмов. В области математической логики широкую известность получили работы Н.М. Нагорного по модификации введенного Клини понятия реализуемого логико-арифметического суждения, играющего важную роль в конструктивной семантике. Эти исследования, начатые Н.М. Нагорным еще в 60-х гг., в самое последнее время привели его к новому, прозрачному по своей идее доказательству непротиворечивости арифметики. Среди значительного числа имеющихся решений этой проблемы, восходящей еще к Д. Гильберту, решение Н.М. Нагорного удачно выделяется своей простотой. После кончины Маркова Н.М. Нагорный завершил начатую учителем новую фундаментальную книгу “Теория алгорифмов” (1984 г.) по основаниям теории алгоритмов и некоторым ее внутриматематическим приложениям, вскоре (1988 г.) переведенную издатель-

ством Kluwer Academic Publishers на английский язык. В конце 1996 г. в издательстве “Фазис” Н.М. Нагорным выпущено второе, существенно расширенное ее издание. В него, в частности, включены результаты исследований Н.М. Нагорного последних лет, конкретизирующих теорему Маркова о распознавании нетривиальных инвариантных (т.н. “марковских”) свойств конечно определенных полугрупп.

Н.М. Нагорный участвовал в разработке системы команд первой серийной советской ЭВМ БЭСМ-2. Описание этой системы, составленное им совместно с В.А. Магариком, выдержало в свое время три издания и пользовалось среди программистов большой и заслуженной известностью. В продолжение этой работы им совместно с Марковым в 60-х гг. был разработан точный язык для описания работы вычислительных машин. Впоследствии на его основе Н.М. Нагорным был разработан язык для описания функционирования систем взаимодействующих машин. Работы эти, бесспорно, были в своей области пионерскими. Широкую известность получил выполненный Н.М. Нагорным перевод с немецкого знаменитой двухтомной монографии Д. Гильберта и П. Бернайса “Основания математики” — пока единственный перевод этой книги на другой язык. Троекратная попытка издательства “Шпрингер” перевести эту книгу на английский успехом не увенчалась. Им переведен также первый том “Лекций по развитию математики в 19-м столетии” выдающегося немецкого математика Ф. Клейна. Особого упоминания заслуживает роль, которую Н.М. Нагорный сыграл как педагог. Его лекционные курсы, семинары в МГУ и МФТИ, и, не в последнюю очередь, личный пример способствовали привлечению к марковской проблематике большого числа талантливой молодежи. Многие его ученики стали известными специалистами и работают ныне как в России, так и за ее пределами.

С 1996 г. работает в отделе интеллектуальных прикладных систем д.ф.-м.н А.А. Зенкин. В середине 90-х гг. А.А. Зенкиным создано новое направление в области искусственного интеллекта — когнитивная компьютерная графика (ККГ), суть которого состоит в разработке человеко-машинного интерфейса, основанного на ККГ-визуализации абстрактных математических объектов. На основе этого подхода была разработана диалоговая система для ККГ-исследований проблем аддитивной теории чисел, с помощью которой получены важные научные результаты в области классической теории чисел, логики и оснований математики и развиты основы общей методологии применения ККГ для интенсификации процессов научного творчества. По проблеме применения ККГ А.А. Зенкиным опубликовано свыше 200 научных работ, среди которых первая монография по ККГ [22].

Кроме плановых работ РАН сотрудники отдела вели и продолжают вести исследования по линии РФФИ, по программе “Перспективные информационные технологии” Миннауки и др. программам научных исследований. Результаты, уже полученные и еще ожидаемые при выполнении этих работ, позволяют с определенным оптимизмом смотреть в будущее исследований по проблематике искусственного интеллекта в Вычислительном центре РАН.

### Литература

1. *Поспелов Г.С.* Основы автоматизации. М.: Изд-во ВВА им. Жуковского, 1954.
2. *Поспелов Г.С.* Автоматическое управление полетом самолета. М.: Изд-во ВВА им. Жуковского, 1958.
3. *Поспелов Г.С., Ириков В.А.* Программно-целевое планирование и управление. М.: Советское радио, 1976.
4. *Поспелов Г.С., Вен В.Л., Солодов В.М., Шафранский В.В., Эрлих А.И.* Проблемы программно-целевого планирования и управления. М.: Наука, 1981.
5. *Поспелов Г.С., Ириков В.А., Курилов А.Е.* Процедуры и алгоритмы формирования комплексных программ. М.: Наука, 1985.
6. *Поспелов Г.С.* Искусственный интеллект — основа новой информационной технологии. М.: Наука, 1988.
7. *Поспелов Д.А.* Логические методы анализа и синтеза схем (три издания в СССР: 1964, 1968 и 1974 гг., переведена на болгарский и немецкий).
8. *Пушкин В.Н., Поспелов Д.А.* Мышление и автоматы. М., 1972 (переведена на чешский).
9. *Поспелов Д.А.* Ситуационное управление. Теория и практика. М., 1986.
10. *Поспелов Д.А.* Логико-лингвистические модели в системах управления. М., 1981.
11. *Поспелов Д.А., Литвинцева Л.В., Кандрашина Е.Ю.* Представление знаний о времени и пространстве в интеллектуальных системах. М., Наука, 1987.
12. *Поспелов Д.А.* Моделирование рассуждений. М.: Радио и связь, 1988.
13. *Поспелов Д.А.* Фантазия или наука? На пути к искусственному интеллекту. М., 1984.

14. *Варшавский В.И., Поспелов Д.А.* Оркестр играет без дирижера. М., 1985.
15. *Ефимов Е.И.* Решатель интеллектуальных задач. М.: Наука, 1982.
16. *Дулин С.К., Дулина Н.Г., Киселев И.А.* Тематический мониторинг информационных сообщений. М.: ВЦ РАН, 2000.
17. *Дулин С.К.* Введение в теорию структурной согласованности. М.: ВЦ РАН, 2005.
18. *Гаврилова Т.А., Хорошевский В.Ф.* Базы знаний интеллектуальных систем. СПб.: Питерпресс, 2000.
19. *А.А. Марков, Нагорный Н.М.* Теория Алгорифмов. М.: Фазиз, 1996.
20. *Orlovsky S.A.* Calculus of Decomposable Properties, Fuzzy Sets and Decisions, Alberton Press, Inc., NY., 1994.
21. *Аверкин А.Н., Прокопчина С.В.*, Краткий очерк концепции мягких измерений. СПб.: Гидрометеоздат, 1997.
22. *Зенкин А.А.* Когнитивная компьютерная графика. Применение в классической теории чисел. М.: Наука, 1991.

## ОТДЕЛ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

*В.И. Цурков*

---

После реорганизации отдела академика Г.С. Поспелова в 1988 г. сохранился сектор, возглавляемый д.ф.-м.н. В.Л. Венем, в который перешли некоторые сотрудники и автор этих строк. Благодаря его деятельности в министерстве приборостроения удалось перевести восемь ставок в ВЦ. В этот момент еще присоединились сотрудники лаборатории системного программирования. Так возник новый отдел, который возглавил В.Л. Вен. В 1994 г. он ушел из ВЦ, но при поддержке академика Н.Н. Моисеева отдел удалось сохранить, и им стал руководить автор этих строк. Структура подразделения такова.

Сектор математических методов анализа сложных систем — это, фактически, переименованный и уже упомянутый сектор В.Л. Вена из отдела академика Г.С. Поспелова. Ранее он занимался методами точного и приближенного агрегирования для оптимизационных задач большой размерности из экономики. В 1991 г. В.Л. Вен попросил возглавить сектор автора этих строк, после чего тематика расширилась. Возникли такие направления, как: теория катастроф, многоуровневые задачи физики и техники: блочное математическое программирование и иерархическое управление (д.э.н. В.Г. Медницкий); некорректные задачи и теория эксперимента (к.ф.-м.н. Е.Л. Жуковский, безвременно ушедший из жизни в январе 2005 г.); транспортные задачи и оптимизация на графах и сетях (д.ф.-м.н. А.А. Миронов). Совсем перед миллениумом к автору этих строк обратился сотрудник ВЦ д.ф.-м.н. Д.А. Молодцов с просьбой о переводе в отдел сложных систем. Он работает, представляя тематику мягких множеств, регуляризацию, теорию игр, управления портфелями. Наконец, еще одно направление сектора — это ротационное движение тел с полостями, содержащими жидкость (д.ф.-м.н. А.А. Гурченков). Основные полученные результаты следующие.

Для случая цилиндрической и сферической симметрии найдены сингулярные решения уравнений законов сохранения идеальной жидкости, когда уравнения состояния удовлетворяют статистике вырожденного газа Бозе–Эйнштейна. Решения представляют собой локализованные выбросы плотности и получены на основе найденных автомодельных решений в точке параболического вырождения, которой является абсолютный нуль температуры. Выход на автомодельные решения подтверждается численными расчетами с помощью явных схем для исходной гидродинамической постановки, записанной в инвариантах Римана.

Разработан комбинированный метод для блочных задач математического программирования с целочисленными переменными. Используется лагранжева релаксация для получения оценок по функционалу и локализации компонент оптимального решения. Используется последовательный анализ для усиления локализации и отсева бесперспективных подвариантов. Используются процедуры на основе метода генерации столбцов и метода расщепления в смешанном случае в координирующей части алгоритма.

Разработан метод решения двухуровневых задач математического программирования, возникающих при исследовании моделей эквивалентного обмена ресурсами. Для широкого класса экстремальных задач разработан метод итеративного агрегирования/деагрегирования, позволяющий использовать структуру исходной постановки для получения методов декомпозиции. Метод итеративного агрегирования применен для задач оптимизации и оптимального управления: выпуклого математического программирования, вариационного исчисления, оптимального управления системами с сосредоточенными и распределенными параметрами. Для задач оптимального управления разработана комбинированная техника агрегирования фазовых переменных и управлений, а также пространственных и временных переменных. Разработан метод итеративного агрегирования/декомпозиции для задач оптимизации и управления системами с перекрестными связями различного вида: несепарабельных, частично-сепарабельных, с заданными оценками перекрестных связей, блочных и блочно-сепарабельных. Для иерархических

блочно-сепарабельных задач управления разработан метод декомпозиции, в котором координация подсистем осуществляется путем усреднения (агрегирования) откликов подсистем, а не за счет решения оптимизационной задачи центра. Для задач математического программирования построены эллипсоиды, содержащие оптимальные решения, и получены оценки погрешности агрегирования, основанные на построении выпуклой локализации оптимального решения. Для обобщенной транспортной задачи получены априорные оценки погрешности агрегирования, установлена их корреляция с точной ошибкой агрегирования и обоснована возможность использования таких априорных оценок для выбора агрегированной модели. Предложен метод внутренней точки, использующий выпуклые (конические или эллипсоидальные) локализации оптимального решения при построении задачи выбора направления спуска.

Построены модели сбалансированного роста в системе динамического межотраслевого баланса открытой экономики с мощностями, которые описываются однородными нелинейными производственными функциями. При исследовании этих моделей установлено, что они допускают существование неограниченного сверху темпа роста экономики. Показано, что, фиксируя в отраслях отношения капитала и труда, получаем модель сбалансированного роста, включающую кроме технологических параметров также и традиционные экономические показатели, такие как производительность труда и фондоемкость в отраслях и ряд других. Показано, что в этих моделях уже может существовать только ограниченный сверху темп сбалансированного роста и только в случае продуктивности некоторых матриц. Получены необходимые и достаточные условия продуктивности. Установлена связь этих моделей с задачей блочного программирования, имеющей связующие переменные и ограничения. Показано, что в таких задачах возможна реализация схемы параллельных вычислений, при которых разложение глобальной задачи производится одновременно и по связующим переменным, и по связующим ограничениям. Показано, что в случае остановки метода возникает оптимальное решение глобальной задачи.

Поставлена следующая задача оптимизации. Среди матриц с неотрицательными элементами и с заданными суммами по строкам и столбцам при условии их баланса найти такую, у которой максимальный элемент был бы минимальным. Это эквивалентно классической транспортной задаче с минимаксным критерием. Разработан эффективный алгоритм ее решения на основе характеристических уравнений. Метод является линейным по сложности. Рассматриваются другие минимаксные функционалы а также случай дискретных переменных, проводится обобщение на нелинейный случай с интегральными ограничениями. Анализируются оптимальные решения в связи с теорией многогранных множеств.

Пусть  $A$  — это некоторое множество параметров, которое может иметь произвольную природу (числа, функции наборы слов и т.д.). Пусть  $X$  — это некоторое универсальное множество, над которым определяется мягкое множество.

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ.** Пару  $(S, A)$  будем называть мягким множеством над  $X$ , если  $S$  является отображением из множества  $A$  в множество подмножеств множества  $X$ , т.е.  $S: A \rightarrow 2^X$ .

По сути, мягкое множество представляет собой параметризованное семейство подмножеств. Поскольку мягкое множество понимается как приближенное описание объекта, то оно неминуемо зависит от того, как формулируется понимание приближенности, т.е. мягкое множество является субъективным понятием. Другими словами, выбор того или иного способа приближенного описания объекта зависит от того, как это описание делается, а выбор параметризации явным образом характеризует субъективизм мягкого множества. Разработаны основы теории мягких множеств в качестве методологии и аппарата для оперирования с различными приближенными описаниями, не связанными с предельными переходами, а, напротив, где топология зависит от самих объектов.

Интенсивно изучаются вихревые движения вязкой жидкости в полости вращающихся твердых тел. В линейном приближении получена система интегро-дифференциальных уравнений, описывающая динамику ротационного движения тела с полостью, содержащей вязкую жидкость. Предложен способ учета влияния вязкости на динамику тела с жидкостью. Получен критерий устойчивости вращающегося волчка с вязкой жидкостью. Показано, что влияние вязкости оказывается довольно тонким: в одних случаях вязкость может стабилизировать вращение, в других случаях вязкость может приводить к потере устойчивости. Сформулирован

ряд задач оптимального управления указанными движениями, и разработаны эффективные методы их решения.

Рассматриваются интегральные уравнения с  $\delta$ -образным ядром, которые возникают при обработке спектров физических процессов, в импульсной технике, а также анализе временных рядов. При решении известны оценки, полученные на основе метода наименьших квадратов по Лежандру или Гауссу, и их регуляризованные формы в виде метода ортогональных проекций. В отличие от указанных подходов исследована форма метода наименьших квадратов, которая использует теорию целых функций, когда спектр и протяженность функции связаны соотношением неопределенности.

Сектор систем поддержки принятия решений возник, когда были переведены ранее упомянутые ставки из Минприбора. Его возглавил сначала к.ф.-м.н. О.Г. Григорьев. Проблематика концентрировалась на лингвистических системах ОРФО и КОНТЕКСТ по проверке правописания и машинному переводу. В настоящее время этим направлением руководит к.т.н. А.А. Соколов. После того как еще в начале девяностых О.Г. Григорьев ушел в бизнес, заведующим сектора стал д.ф.-м.н. С.А. Ашманов. Им была привнесена новая тематика по созданию систем идентификации личности по изображению лица. В отделе появилась экспериментальная установка с двумя видеокамерами, присоединенными к компьютеру. Сейчас этой темой руководит к.т.н. А.Б. Мурынин, и удалось организовать успешное сотрудничество с иностранными партнерами. В 1994 г. безвременно скончался С.А. Ашманов и сектором стал заведовать д.ф.-м.н. И.С. Литвинчев. Появилась тематика сетей и телекоммуникаций. Основные полученные результаты следующие.

Разработана система обработки текстов на русском языке ОРФО, которая включает в себя подсистемы проверки орфографии, грамматики и стиля, расстановки переносов, а также толковый словарь, тезаурус, грамматический справочник по русскому языку, модуль пополнения морфологического словаря, поиска и замены слов во всех формах, модуль автоматического составления аннотаций и система КОНТЕКСТ — интеллектуальный англо-русско-английский компьютерный словарь, включающий в себя развитую программную оболочку и обширный набор словарей (общелексических и по специальной грамматике). Основой систем являются модели флективных языков для применения в задачах проверки правописания. Осуществлена адаптация модели префиксально-флективного словоизменения для английского языка, и выполнено построение словаря характеристических суффиксов в задачах автоматического обучения парадигме при пополнении словаря. Разработан язык описания шаблонов грамматических и синтаксических ошибок. Реализована оптимизация алгоритмов поиска фраз в двуязычных и толковых словарях методом инвертированных списков.

Разработаны принципы построения автоматических распознающих систем, использующих стереоскопическое зрение. Разработаны методика, алгоритмы и программное обеспечение распознавания личности по стереоизображениям лица, которые реализованы в лабораторных макетах автоматической распознающей системы на базе персонального компьютера. Рассматриваются вопросы создания компьютерных систем, предназначенных для распознавания человека по стереоизображениям лица, вводимым в реальном масштабе времени, а также выбора эффективных информативных признаков и методов обработки изображений с использованием системы стереоскопического компьютерного зрения. Показано, что привлечение объемного зрения позволяет уменьшить влияние ракурса и расстояния съемки лица на возможность распознавания его компьютерной системой. Проведены исследования по проверке гипотезы о взаимосвязи глазных заболеваний и асимметрии черепа. Изучена принципиальная возможность измерений асимметрии черепа системой компьютерного стереозрения для диагностики косоглазия. Исследования проводились совместно с отделением реабилитации детей и подростков Комплексного центра социального обслуживания “Вешняки” и другими заинтересованными организациями. Разработаны основные принципы построения системы стереоскопического зрения роботов. Рассмотрены базовые принципы построения алгоритмов предварительной обработки изображений и поиска соответственных точек на стереопарах. Приведен анализ методов повышения надежности результатов измерений. Предложен алгоритм коррекции недостоверных данных при измерениях. Дан принцип разделения зон видимости на ближнюю, среднюю и дальнюю. Анализируются возможности измерений рельефа поверхности и расстояний до объектов. Приведена обработка

экспериментальных данных. Разработан подход к решению задачи восстановления трехмерной поверхности движущегося объекта корреляционным методом с использованием монокулярной системы компьютерного зрения. Представлены оптимизационные методы, использованные для доработки корреляционного алгоритма, позволяющие воспользоваться специфическими особенностями данной задачи. Разработан метод вычисления корреляционной функции, позволяющий существенно сократить время вычислений. Разработан метод автоматического выбора области сканирования, основанный на статистическом анализе двумерного распределения оценок диспаратности. Метод восстановления поверхности по серии снимков методом факторизации основан на использовании априорной информации для задания начальных значений в модели перспективной проекции. Оптимизирован алгоритм нахождения максимума корреляционной функции. Описаны примеры практического применения данных методов и полученные результаты.

Разработаны двухуровневые модели взаимодействия элементов сети вычислительных центров. Модели построены по принципу эквивалентного обмена и приводят к нелинейным задачам двухуровневого математического программирования. Разработаны методы решения таких постановок, основанные на сведениях к задачам смешанного целочисленного программирования. Разработана методика получения корреляционных зависимостей телефонных плотностей от нескольких экономических показателей развития региона. Подход основан на мультипликативном представлении функций многих переменных.

Разработана теория применения нелинейных параболических уравнений типа диффузии в задаче удаления шумов на изображении. Установлено одновременное сохранение кромок (бесконечных градиентов) на изображении и подавление шумов. Предложена эффективная численная схема решения получаемых уравнений, пригодная для эффективной обработки двумерных и многомерных изображений. Установлена разрешимость предложенного уравнения в функциональных классах. В результате построен эффективный адаптивный фильтр для изображений.

Сектор интеллектуальных управляющих систем был образован после прихода в отдел коллектива бывшей лаборатории системного программирования. Сначала его возглавил к.ф.-м.н. Г.А. Сенин. Тематика была связана с системным программированием, информационными системами и базами данных. Затем в 1991 г. зав. сектором стал В.Л. Вен, и основным направлением стала разработка системы СПЕКТР для автоматизации управленческой деятельности. В 1994 г. руководить сектором стал к.т.н. В.Н. Захаров, и в проблематике появилось направление, связанное с интеллектуальным управлением на основе нечетких логик с приложением в робототехнике и медицинских приборах. Совсем недавно В.Н. Захаров ушел из жизни, и на эту должность был назначен к.ф.-м.н. И.А. Матвеев. Основные полученные результаты следующие.

Ведутся активные исследования в области создания современных управляющих систем, начатые еще трудами Д.А. Поспелова по ситуационному управлению. В настоящее время созданы предпосылки к разработке теории управления плохо формализуемыми объектами и технологическими процессами. Разработаны принципы построения и методология проектирования систем управления с применением шести основных направлений современной информационной технологии: инженерия знаний и вывод на знаниях; обработка нечеткой информации; нейросетевая обработка информации; мягкие вычисления (soft computing); эволюционное моделирование и генетические алгоритмы; распределенный искусственный интеллект и многоагентные системы. На стыке традиционной теории и искусственного интеллекта созданы основы теории построения многоуровневых систем интеллектуального управления. Разработаны прикладные системы управления многозвенным роботом и аппаратом искусственной вентиляции легких.

Исследована зависимость поведения зрачка человека (в частности, в ответ на световой стимул-раздражитель) от функционального состояния организма, и разработана методика диагностики функционального состояния по зрачковой реакции. Предварительные исследования показывают несомненное наличие связи функционального состояния организма и зрачковой реакции, однако до сих пор не построена модель поведения зрачка, равно как не известно с приемлемой точностью влияние на него различных факторов (усталость, стресс и т.п.). На первом этапе исследования определяются факторы, влияющие на зрачковую реакцию и их вес. На втором этапе строится модель, связывающая найденные факторы – показатели физического и психического состояния человека (в том числе, оцениваемые качественно, по двух-пятибалльной шкале) с параметрами зрачковой реакции. Прообразом модели может служить

нервно-мышечная подсистема мозга и радужки, отвечающая за движение зрачка, имеющая несколько разнородных обратных связей и параметры, определяемые состоянием организма. На третьем этапе разработан метод определения состояния организма по характеристикам движения зрачка. Привлекательность метода заключается в том, что реакция зрачка на световой раздражитель представляет собой безусловный рефлекс, не поддающийся контролю со стороны коры головного мозга, а значит, и сознания. Вместе с тем это уникальный и чувствительный индикатор широкого спектра физиологических процессов, зависящих от состояния симпатопарасимпатического баланса.

За прошедшие 15 лет докторскую и кандидатскую подготовку получили соответственно 5 и 30 человек. В настоящее время учатся в аспирантуре и являются соискателями 8 человек.

В отделе постоянно ведутся работы по международным проектам, грантам РФФИ и Миннауки, имеются совместные исследования с другими отделами ВЦ. Сотрудники ведут преподавательскую деятельность в российских и зарубежных университетах, участвуют в международных и национальных конференциях.

### Список основных публикаций

1. Цурков В.И. Декомпозиция в задачах большой размерности. М.: Наука, 1981.
2. Цурков В.И. Динамические задачи большой размерности. М.: Наука, 1988.
3. Цурков В.И., Литвинчев И.С. Декомпозиция в динамических задачах с перекрестными связями. Ч. 1, 2. М.: Наука, 1994.
4. Цурков В.И., Авербах И.Л. Декомпозиция в целочисленном блочном программировании. М.: Наука, 1995.
5. Миронов А.А., Цурков В.И. Транспортные задачи с минимаксным критерием. М.: Наука, 1997.
6. Цурков В.И., Ковков Д.В. Нелинейная диффузия и подавление шумов. М.: Физматлит, 2004.
7. Tsurkov V. I., Mironov A. A. Minimax Under Transportation Constraints. Kluwer Academic Publishers, Boston, Dordrecht, London, 1999.
8. Tsurkov V. I. Hierarchical Optimization and Mathematical Physics. Kluwer Academic Publishers, Boston, Dordrecht, London, 2000.
9. Tsurkov V. I. Large-Scale Optimization Problems and Methods. Kluwer Academic Publishers, Boston, Dordrecht, London, 2001.
10. Tsurkov V. I. Majorant Catastrophe in Euler Gas Dynamics Equations for Bosons. Felicity Press, USA, 1998.
11. Litvinchev I., Tsurkov V. Aggregation in Large Scale Optimization, Kluwer Academic Publishers, Boston, Dordrecht, London, 2003.
12. Литвинчев И.С. Оценки субоптимальности агрегирования в выпуклом программировании // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1993. Т. 33. № 8.
13. Litvinchev I., Rangel S. Localization of optimal solution and a posteriori bounds for aggregation // Computers & Operations Research. 1999. V. 26. № 10–11. P. 967–988.
14. Литвинчев И.С. Использование нижних оценок при минимизации методом внутренней точки // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1994. Т. 34. № 7. С. 978–988.
15. Litvinchev I.S., Silva G.N., Treskov Yu.P. Aggregation-based decomposition for multi-divisional models // J. Comput. Syst. Sci. Int. 1999. V. 38. № 2. P. 244–254.
16. Litvinchev I.S. A two-level decomposition-aggregation approach for large scale optimal control problems // J. Comput. Appl. Math. 1995. V. 61. № 2. P. 117–137.
17. Litvinchev I.S. Decomposition-aggregation and parallel computations in large-scale extremal problems // J. of Advances in Engineering Software. 1995. V. 22. № 1. P. 21–27.
18. Litvinchev I.S. Iterative aggregation method for constrained optimal control problems // J. Comput. Appl. Math. 1992. V. 39. № 3.
19. Litvinchev I.S. Decomposition-aggregation method for convex programming problems // Optimization. 1991. V. 22. № 1.
20. Литвинчев И.С. Эллипсоиды содержащие оптимальные решения задачи линейного программирования // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 2000. Т. 40. № 2. С. 200–210.
21. Litvinchev I. On improved Choi-Goldfarb solution-containing ellipsoids in linear programming // Operations Research Letters. 2000. V. 27. № 1. P. 29–37.
22. Litvinchev I., Rangel S. Using error bounds to compare aggregated generalized transportation models // Ann. Oper. Res. 2004. V. 132. № 1–4. P. 21–27.
23. Litvinchev I. A circular cone relaxation primal interior point algorithm for LP // Optimization. 2003. V. 52. № 4–5. P. 529–540.
24. Silva G., Litvinchev I., Rojas-Medar M., Brandao A. State constraints in optimal impulsive controls // Computational and Applied Mathematics. 2001. V. 19. № 2. P. 179–206.



25. *Alvarez A., Chacon O., Litvinchev I., Rangel S.* Aggregation in the generalized transportation problem // ТИСУ. 2001. № 6. С. 84–90.
26. *Лохин В.М., Захаров В.Н.* Интеллектуальные системы управления: понятия, определения, принципы построения // Интеллектуальные системы автоматического управления. Под ред. И.М. Макарова и В.М. Лохина. М.: Физматлит, 2001.
27. *Захаров В.Н., Кантор П.С.* Интеллектуальная система управления процессом искусственной вентиляции легких // Интеллектуальные системы автоматического управления / Под ред. И.М. Макарова и В.М. Лохина. М.: Физматлит, 2001.
28. *Захаров В.Н., Фет Я.И.* Введение в раздел “Искусственный интеллект” // История информатики в России: ученые и их школы. Составители: Захаров В.Н., Подловченко Р.И., Фет Я.И. М.: Наука, 2003.
29. *Захаров В.Н., Ульянов С.В.* Нечеткие модели интеллектуальных промышленных регуляторов и систем управления. I–IV // Известия РАН. Техническая кибернетика. 1992. № 5; 1993. № 4; 1993. № 5; 1994. № 5.
30. *Захаров В.Н., Ульянов С.В.* Принципы построения интеллектуальных машин и когнитивных систем управления // Проблемы обработки информации. М.: ИФТП РАН, 1993.
31. *Zakharov V.N., Ulyanov S.V.* Fuzzy Models of Intelligent Industrial Controllers and Control System. I–III // J. Comput. Syst. Sci. Int. 1994. V. 32, № 1; 1995. V. 33, № 2.
32. *Валаев Г.Н., Войцекян В.А., Захаров В.Н., Шевяков В.П.* Реконфигурируемая вычислительная среда в интеллектуальной системе управления автономным ЛА // ТИСУ. 1995. № 4. С. 234–245.
33. *Захаров В.Н., Кантор П.С., Лопашов В.И., Ульянов С.В.* Интеллектуальные системы управления аппаратами искусственной вентиляции легких. I. Принципы построения // ТИСУ. 1996. № 1. С. 166–173.
34. *Zakharov V.N., Kantor P.S., Lopashov V.I., Ulyanov S.V.* Intelligent Systems of Control of Apparatuses for Artificial Ventilation of the Lungs. I. Principles of Construction // J. Comput. Syst. Sci. Int. 1996. V. 35, № 1. P. 158–164.
35. *Захаров В.Н.* Интеллектуальные системы управления: основные понятия и определения // ТИСУ. 1997. № 3. С. 138–145.
36. *Zakharov V.N.* Intelligent Control Systems: Principal Concepts and Definitions // J. Comput. Syst. Sci. Int. 1997. V. 36, № 3. P. 462–468.
37. *Захаров В.Н., Кантор П.С., Ткаченко Д.Г.* Синтез логических контроллеров с использованием механизмов обработки нечеткой информации // Известия РАН. Теория и системы управления. 2000. № 4. С. 134–142.
38. *Zakharov V.N., Kantor P.S., Tkachenko D.G.* Synthesis of Logical Controllers with the Use of Methods of Processing Fuzzy Data // J. Comput. Syst. Sci. Int. 2000. V. 39, № 4. P. 615–622.
39. *Захаров В.Н.* Интеллектуальные системы логического управления: преодоление неопределенности на исполнительном уровне // Известия РАН. Теория и системы управления. 1999. № 5. С. 94–100.
40. *Башлыков А.М., Соколов А.А.* Автоматическое построение списка характеристических суффиксов для произвольного флективного языка // Известия РАН. Теория и системы управления. 1999. № 5. С. 70–73.
41. *Башлыков А.М., Ашманов И.С., Руссова Н.В., Соколов А.А.* Автоматизация обработки текстов. Прикладная система обеспечения работы с текстами на русском языке // Известия РАН. Теория и системы управления. 1998. № 3. С. 144–148.
42. *Жуковский Е.Л.* Обработка данных на основе соотношения неопределенности // Известия РАН. Теория и системы управления. 2003. № 4. С. 30–33.
43. *Жуковский Е.Л.* Решение интегральных уравнений с  $\delta$ -образным ядром // Сибирский журнал вычислительной математики. 2004. Т. 7, № 3. С. 229–240.
44. *Жуковский Е.Л.* О задаче управления по априорной информации в условных линейных системах // Известия РАН. Теория и системы управления. 2004.
45. *Жуковский Е.Л.* Устойчивый метод нахождения общего решения уравнения Винера-Хопфа // Известия РАН. Теория и системы управления. 1998. № 3. С. 5–7.
46. *Жуковский Е.Л.* Оптимизационные задачи в обработке и интерпретации данных // Известия РАН. Теория и системы управления. 2002. № 1. С. 20–35.
47. *Мурынин А.Б.* Автоматическая система распознавания личности по стереоизображениям // Известия РАН. Теория и системы управления. 1999. Т. 1, № 38. С. 106–114.
48. *Мурынин А.Б., Матвеев И.А.* Идентификация объектов по стереоизображениям. Оптимизация алгоритмов восстановления поверхности // Известия РАН. Теория и системы управления. 1998. № 3.
49. *Кузнецов В.Д., Матвеев И.А., Мурынин А.Б.* Идентификация объектов по стереоизображениям. Оптимизация информационного пространства // Известия РАН. Теория и системы управления. 1998. № 4.

50. *Kryuchenkov V.F., Matveev I.A., Kuznetsov V.D., Murynin A.B.* Estimation of Bilateral Facial Symmetry Deviation using Stereoscopic Computer Vision System // *Pattern Recognition and Image Analysis*. 2001. V. 11, № 2. P. 350–352.
51. *Колбанов В.М., Медницкий В.Г.* О решении задач перестройки структуры производства // *Известия РАН. Теория и системы управления*. 1998. Т. 37, № 1.
52. *Медницкий В.Г., Евдокимов М.В., Медницкий Ю.В.* Математическая модель реконструкции производства // *Известия РАН. Теория и системы управления*. 2001. № 2.
53. *Жуковский Е.Л., Колбанов В.М., Медницкий В.Г., Медницкий Ю.В.* Об одной модификации задачи Д. фон Неймана // *Известия РАН. Теория и системы управления*. 2000. № 4.
54. *Евдокимов М.В., Медницкий В.Г., Медницкий Ю.В.* Задача оптимизации развития производства // *Известия РАН. Теория и системы управления*. 2001. № 3.
55. *Евдокимов М.В., Колбанов В.М., Медницкий В.Г., Медницкий Ю.В.* Оптимальная реконструкция производственных систем со случайными параметрами // *Известия РАН. Теория и системы управления*. 2002. № 2.
56. *Медницкий В.Г., Медницкий Ю.В.* Агрегирование в линейном программировании и в матричных играх // *Известия РАН. Теория и системы управления*. 2001. № 4.
57. *Евдокимов М.В., Медницкий В.Г., Сигал И.Х.* Бикритериальная задача переоборудования производства // *Известия РАН. Теория и системы управления*. 2001. № 5.
58. *Гурченков А.А., Кулагин Н.Е.* Аналитические исследования газокинетических и гидродинамических задач. М.: Издательство МГОУ, 2003.
59. *Гурченков А.А.* Неустановившееся движение вязкой жидкости между вращающимися параллельными стенками при наличии поперечного потока // *Журнал прикладной математики и технической физики*. 2001. Т. 42, № 4. С. 48–51.
60. *Яламов Ю.И., Гурченков А.А.* Диссипация энергии в колеблющейся полости с вязкой жидкостью и конструктивными неоднородностями // *ДАН*. 2002. Т. 382, № 4. С. 470–473.
61. *Яламов Ю.И., Гурченков А.А.* Неустановившееся движение вязкой жидкости между вращающимися параллельными стенками с учетом теплового скольжения вдоль одной из них // *ДАН*. 2002. Т. 382, № 1. С. 54–57.
62. *Гурченков А.А.* Задача о колебаниях ротора, содержащего жидкость со свободной поверхностью // *Ж. вычисл. матем. и матем. физ.* 2002. Т. 42, № 1. С. 90–94.
63. *Gourchenkov A.A.* A model of the viscous fluid unsteady flow in rotating slot // *Syst. Anal. Modelling Simulation*. 2001. V. 40.
64. *Гурченков А.А.* Вихревые движения жидкости в полости вращающегося тела. М: Народный учитель, 2001.
65. *Молодцов Д.А.* Теория мягких множеств. М.: Едиториал УРСС, 2004.
66. *Molodtsov D.A.* Soft Set Theory — First results // *Comput. Math. Appl.* 1999. V. 37. P. 19–31.
67. *Молодцов Д.А.* Описание зависимостей при помощи мягких множеств // *Известия РАН. Теория и системы управления*. 2001. № 6. С. 137–144.
68. *Ковков Д.В.* Существование и единственность решений некоторых нелинейных параболических уравнений // *Дифференц. уравнения*. 2003. Т. 39, № 12. С. 1677–1683.

## ОТДЕЛ НАУЧНОЙ ИНФОРМАЦИИ

*С.И. Гусев, Е.Г. Козлова, А.А. Муромский, Е.И. Моисеев, Н.П. Петрова, Н.П. Тучкова*

---

Исторически отдел научной информации получил свое название в последние годы. Он вырос из номографического сектора, лаборатории таблиц и номограмм, далее отдела научно-технической информации, который включал в себя сектор номографии, сектор специальных функций и дифференциальных уравнений, редакционный отдел и подразделение оперативной полиграфии.

Научно-исследовательская работа отдела охватывала следующие направления: краевые задачи и специальные функции, методы номографирования, информационное обеспечение сотрудников ВЦ РАН.

### **Лаборатория контроля и обработки научной информации**

История отдела научной информации начинается с момента издания приказа 1 января 1968 г. об образовании в ВЦ АН СССР подразделения ЛКОНИ — лаборатории контроля и обработки научной информации. К.А. Карпов и Э.А. Чистова были назначены соответственно зав. лабораторией и зав. сектором. Среди первых сотрудников были: Г.И. Шипилова, Л.И. Семенова, позднее появились Ю.С. Крымов, Т.П. Катрич, А.А. Муромский и др.

А.А. Муромский и Э.А. Чистова участвовали в издании сборника “Алгоритмы и Программы” ГПНТБ (по постановлению ГКНТ СССР и Президиума АН СССР ВЦ АН СССР обеспечивал научную поддержку этого издания).

Лаборатория К.А. Карпова в целом занималась Всесоюзным фондом алгоритмов и программ. Это была многоплановая работа. Главой фонда был директор ВЦ АН СССР академик А.А. Дородницын.

По инициативе А.А. Дородницына на базе БЭСМ-6 была образована информационно-поисковая система (ИПС) по алгоритмам и программам сначала с использованием системы АСИОР, а позднее — МОДИС. В ИПС ВЦ АН СССР был накоплен значительный объем информации, доступный всем институтам АН СССР. Отметим, что аналог этой информации, а точнее, дубль находится в базах данных ГПНТБ СССР (России). ИПС в основном занимались Э.А. Чистова, Т.П. Катрич, О.М. Иванова, А.А. Муромский, позднее присоединился К.В. Туляков. Здесь следует отметить большую поддержку информационным делам со стороны академика Г.С. Поспелова (в то время Г.С. Поспелов был руководителем большого коллектива).

После демонтажа БЭСМ-6 дирекция института стала финансировать информационное обслуживание коллектива на договорной основе с московскими информационными центрами (ГПНТБ, ВИНТИ, ИНИОН и др.). В основном эту работу проводили А.А. Муромский и Т.В. Сидорова. Около четырехсот запросов охватывали политематику института. После внедрения ИНТЕРНЕТ и создания локальной сети института эта работа была свернута.

Отметим, что сотрудники К.А. Карпов, Э.А. Чистова, А.А. Муромский и К.В. Туляков неоднократно участвовали в работе конференций, семинаров, где выступали с докладами. За успешную работу некоторые сотрудники были отмечены наградами: К.А. Карпов был награжден Орденом Трудового Красного Знамени; Э.А. Чистова — медалью ВДНХ; К.А. Карпов, Э.А. Чистова и А.А. Муромский — почетными грамотами, подписанными Президентом АН СССР М.В. Келдышем (февраль 1974 г.).

### **Номографическая группа в ИТМ и ВТ АН СССР**

Начало развития теоретической и практической номографии в Советском Союзе относится к тридцатым годам. Оно связано с именами Н.А. Глаголева и И.Н. Денисюка.

В это время Н.А. Глаголев [1] возглавил первый в Советском Союзе научный центр по номографии — номографический семинар при научно-исследовательском институте математики

МГУ и руководил им до самой своей кончины в июле 1945 г. С 1945 г. по 1963 г. семинар продолжал работать в МГУ под руководством С.С. Бюшгенса и С.В. Бахвалова.

В 1950 г. по инициативе директора Института точной механики и вычислительной техники АН СССР академика М.А. Лаврентьева в отделе приближенных вычислений этого института была организована номографическая группа, которая должна была заниматься вопросами номографирования функций. Она состояла из трех человек: руководителя группы М.В. Пентковского, Г.С. Хованского и Т.В. Фирсовой. Сотрудники этой группы ранее вели научную и практическую работу в области номографии.

Первой практической работой, выполненной в номографической группе, был атлас номограмм с ориентированным транспарантом в виде линейки для гидравлического расчета трапецеидальных каналов [2,3]. Этот атлас в 1956 г. был переиздан в КНР. В 1951 г. на конкурсе научных работ в ИТМ и ВТ АН СССР М.В. Пентковский и Г.С. Хованский получили первую премию.

Были построены рабочие номограммы для “Водгео”, “Мосочиствода”, “Гипроуглемаша”, “Тизприбора” и других организаций.

### Сектор номографии в ВЦ АН СССР

В сентябре 1955 г. номографическая группа ИТМ и ВТ АН СССР вошла в лабораторию таблиц и номограмм Вычислительного центра АН СССР в качестве сектора номографии.

С 1968 г. заведующим сектором номограмм был Георгий Сергеевич Хованский (1921–1999). В секторе в разное время работали также научные сотрудники С.Н. Борисов (1930–2003), Д.Г. Лаптева (1931–2001), С.И. Гусев, Н.П. Тучкова. В секторе номографии в разное время работали Г.Е. Джемс-Леви и Т.И. Кузнецова. В работе сектора активное участие принимали аспиранты Н. Ульмасов, Д.П. Чорбаджиев, С.А. Романов, Е.А. Силаева, В.Б. Хейнман, Б.Д. Арончик, Г.Н. Потетюнко, Ф. Умаров, В.В. Чибисов, О.Н. Ляшенко, Н. Шерматов. С 1955 г. до мая 1999 г. сектором заведовал Г.С. Хованский, а с 1999 г. по 2003 г. — С.Н. Борисов.

Остановимся на наиболее важных результатах по номографии, полученных в секторе [1–37], в области разработки эффективных методов построения номограмм и их практического применения в науке и инженерии.

Разработана методика построения элементарных и составных одноплоскостных номограмм — из выравненных точек [5, 6 (№№ 1, 3, 9), 8–9]; ромбоидальных и барицентрических [10–11, 6 (№№ 10, 11, 16); 10]; приспособляемых номограмм из равноудаленных точек [10, 6 (№№ 4, 7, 8, 13, 14, 16); 12, 13;] и циркульных [6 (№ 9), 9–11]. Выделены частные канонические формы зависимостей, представимых такими номограммами, и исследованы возможности их преобразования. Номограммы этих типов нашли широкое применение на практике.

Ценным свойством транспарантных номограмм является наглядность. Перемещая транспарант по неподвижной плоскости, можно сразу охватить взглядом совокупность всех решений заданной системы уравнений или отдельного уравнения. При этом легко проследить влияние каждой из переменных на результат. Другим ценным свойством таких номограмм является равноправность решения прямых и обратных задач. Развита методика построения общих транспарантных номограмм и их частных случаев — номограмм с ориентированным транспарантом и с одной степенью свободы перемещения транспаранта [4, 5, 6 (№№ 1, 6, 8, 16), 10, 11–13, 34].

Разработаны методы номографирования зависимостей с несколькими комплексными переменными, основанные на использовании номограмм с ориентированным транспарантом, ромбоидальных и барицентрических [6 (№№ 5, 7–10)]. Выделены канонические формы зависимостей, представимых такими номограммами.

Получен ряд результатов по приближенному номографированию и связанным с ним вопросам. Приближенное номографирование основано на замене заданной зависимости номографируемой с некоторой допустимой погрешностью в заданных пределах изменения переменных. Значение приближенного номографирования состоит в том, что оно расширяет возможности номографии, открывая пути номографирования таких зависимостей, которые классическими способами нельзя номографировать.

Одним из важных результатов в области приближенного номографирования можно считать разработку методов номографирования табличных ячеек с двумя, тремя и четырьмя входами при условии допустимости линейной интерполяции по каждой переменной [9, 6 (№№ 2, 9)].

*Г.С. Хованский (1921–1999)**С.Н. Борисов (1930–2003)*

Построенные таким путем номограммы являются точными для соответствующих интерполяционных формул и приближенными для отвечающих им табличных ячеек.

Другим существенным результатом является разработка методов построения приближенных чебышевских номограмм из выравненных точек [6 (№№ 4–6, 8–9, 12)]. Заслуживают внимания и другие разработанные методы приближенного номографирования: методы построения приближенных сетчатых номограмм и номограмм из выравненных точек для зависимостей с четырьмя и большим числом переменных [6 (№№ 6–7)]; методы приближенного номографирования функций трех и четырех переменных, основанные на использовании общей транспарантной номограммы и ее частных случаев [6 (№ 13), 28]; методы построения приближенных номограмм из равноудаленных точек, циркульных, барицентрических, ромбоидальных, с ориентированным транспарантом [19, 32].

К методам приближенного номографирования примыкают разработанные методы номографирования полиномов от нескольких переменных и некоторых обобщений таких полиномов [6 (№№ 11–12, 15)].

На основе транспарантных номограмм были разработаны номографические методы подбора параметров эмпирических формул по опытным данным [4, 10, 6 (№№ 2, 4, 5, 6; 8; 9, 14)] и номографические методы исследования экстремальных свойств функциональных зависимостей [6 (№ 3), 10, 13, 33], дающие возможность не только находить экстремальное значение функции, но и исследовать поведение функции вблизи экстремальной точки.

Разработаны алгоритмы и программы применительно к АЛГОЛ-60, БЭСМ-6 и графопостроителю “КАЛЬКОМП” для расчета и вычерчивания номограмм по уравнениям их элементов и для конструирования, расчета и вычерчивания стандартных типов номограмм, когда исходными данными являются соответствующий тип номограммы, пределы изменения переменных и размеры чертежа [6 (№№ 9–10, 2–17), 7, 13, 15, 17–20, 36, 37].

В секторе номографии постоянно проводилась работа по построению номограмм для конкретных задач. При построении этих номограмм использовались разработанные методы номографирования. Некоторые из номограмм были опубликованы отдельными изданиями. Кроме того, много номограмм было опубликовано в различных инженерных журналах.

Сделаем некоторые пояснения к публикациям [10, 11–12, 15, 32, 37]. Монография [20] написана по результатам докторской диссертации [25]. Монография [14] — это учебное пособие по современной номографии. Работа [37] объединяет некоторые из новых методов



*На снимке: (в верхнем ряду) С.И. Гусев, Ф. Умаров, С.Н. Борисов, З.В. Дземянко, Д.Г. Лаптева,  
(в нижнем ряду) И.Н. Денисюк, Т.В. Фирсова, Г.С. Хованский*

номографирования, разработанных после выхода в свет монографии [15]. Монография [35] — одна из последних работ, содержащая отдельные оригинальные номограммы различных типов, построенные сотрудниками и аспирантами сектора номографии за все время его существования. Работа [37] издана после смерти Г.С. Хованского и содержит описание его номографического архива.

Одной из эффективных форм деятельности сектора номографии, способствовавшей объединению номографов нашей страны, был выпуск номографических сборников. Первым шагом в этом направлении был выпуск в 1959 г. сборника “Вычислительная математика” [5], целиком посвященного номографии. С 1962 г. сектор организует систематический выпуск номографических сборников. Всего опубликовано 17 номографических сборников [6 (№№ 1–17)]. В них содержится 298 статей: 28 обзорных статей, 80 статей по приложению номографии к решению практических задач, 130 статей по методам номографирования (в том числе 27 статей по машинным методам построения номограмм) и 60 статей по теоретическим вопросам номографии.

Авторами приведенных ниже сборников являются сотрудники сектора и другие номографы. В сборниках опубликовано 22 обзорные и научные статьи номографов ГДР, ЧССР, ВНР, СРБ, СРР, Японии.

Задачей номографических сборников являлось объединение всего нового, что происходило в номографии, начиная от практических работ, использующих современные методы номографирования, и кончая теоретическими разработками. Каждый сборник представляет собой стройное целое, а статьи сборника дополняют друг друга и дают общую картину последних достижений в области номографии. Номографический сборник широко был известен у нас и за рубежом. Его получали библиотеки Англии, Франции, США, Канады, Индии и других стран.

Сектор номографии поддерживал научные контакты с зарубежными номографами. Сотрудники сектора принимали участие в международных номографических форумах, которые состоялись в Чехословакии в 1959 г. и 1964 г. [6 (№№ 2, 3); 21], в Румынии — в 1963 г. [6 (№ 2)], в Германии — в 1968 г. [23]. Несколько статей сотрудников сектора номографии было опубликовано в ЧССР и ГДР. Номографы ГДР, СРР, НРБ приезжали в сектор номографии и выступали с докладами на номографических семинарах. В секторе номографии подготовил свою кандидатскую диссертацию аспирант из НРБ Д.П. Чорбаджиев [24]. В работе E. Schwarz [25], содержащей пояснительный текст к номограммам на немецком и русском языках, русский перевод был выполнен в ВЦ АН СССР.

Сектор номографии был инициатором различных номографических форумов в нашей стране, которые проводились как совместно с другими организациями, так и самостоятельно.

На номографических форумах — конференциях, семинарах, школах — сотрудниками сектора было сделано около 300 докладов по прикладным и теоретическим вопросам номографии.

Для пропаганды номографических методов и внедрения их в практику читались лекции, делались выставки книг о номографии в библиотеках.

В секторе были подготовлены и успешно защищены 2 докторских и 15 кандидатских диссертаций. В это число входят диссертации сотрудников сектора С.Н. Борисова, Д.Г. Лаптевой, и С.И. Гусева. В ВЦ АН СССР регулярно проходили стажировку по номографии преподаватели из высших учебных заведений страны.

Сотрудники сектора консультировали в области номографирования различные организации, в частности: “Водгео”, “Мосгипротранс”, “Союзпроммеханизация”, “Энергопромполимер”, “Мосинжпроект”, “Союзводпроект” и др.

### Публикации по номографии, выполненные с участием сотрудников сектора

1. *Глаголев Н.А.* Курс номографии, изд. 2-е (с дополнениями А.А. Глаголева и С.В. Бахвалова). М.: Высшая школа, 1961. 269 с.
2. *Хованский Г.С.* Гидравлический расчет труб по транспарантным номограммам. М.: Мин-во ком. хозяйства РСФСР, 1952. 24 с., 2 номограммы в конверте.
3. *Хованский Г.С.* Атлас номограмм для гидравлического расчета трапецеидальных каналов по полной формуле академика Н.Н. Павловского. М.: Изд-во АН СССР, 1954. 27 с., 24 номограммы в папке.
4. *Хованский Г.С.* Номограммы с ориентированным транспарантом. М.: Гос. изд-во тех.-теор. лит., 1957. 204 с.
5. Вычислительная математика. Сб. 4. М.: Изд-во ВЦ АН СССР, 1959. 184 с.
6. Номографические сборники: № 1, 1962, 247 с.; № 2, 1964, 200 с.; № 3, 1965, 168 с.; № 4, 1967, 229 с.; № 5, 1968, 220 с.; № 6, 1969, 225 с.; № 7, 1970, 144 с.; № 8, 1971, 182 с.; № 9, 1973, 189 с.; № 10, 1975, 215 с.; № 11, 1976, 152 с.; № 12, 1978, 109 с.; № 13, 1982, 173 с.; № 14, 1982, 130 с.; № 15, 1986, 147 с., № 16, 1990, 190 с. М.: ВЦ АН СССР; № 17, 2000, 120 с. М.: ВЦ РАН.
7. Алгебра, логика и вычислительная математика. Межвузовский сборник. Иваново: ИвГУ, 1976. 164 с.
8. *Хованский Г.С.* Эффективный метод построения номограмм для произведения степенных функций. М.: ВЦ АН СССР, 1959. 24 с.
9. *Улановский В.П., Хованский Г.С.* Интерполирование табличных функций многих переменных средствами численного и номографического представления. М.: ВЦ АН СССР, 1963. 75 с.
10. *Хованский Г.С.* Методы номографирования. М.: ВЦ АН СССР, 1964. 224 с.
11. *Хованский Г.С.* Что такое номография. М.: ВЦ АН СССР, 1969. 65 с.
12. *Хованский Г.С.* Основы номографии, М.: Наука, 1976. 352 с.
13. *Хованский Г.С.* Номография и ее возможности. М.: Наука, 1977. 128 с.
14. *Гусев С.И., Никулин С.Н., Хованский Г.С., Шейнкин Г.Ю.* Методы номографии для определения оптимальных параметров элементов оросительных систем при поливе дождеванием. Саратов: Саратовск. ун-т., 1978. 194 с., 42 номограммы.
15. *Khovanski G.* Éléments de nomographie. Moscou: Éditions Mir, 1979. 368 p.
16. *Борисов С.Н.* Методика построения номограмм с помощью БЭСМ-6. М.: ВЦ АН СССР, 1982. 68 с.
17. *Борисов С.Н.* Автоматическое конструирование номограмм с помощью БЭСМ-6. М.: ВЦ АН СССР, 1982. 70 с.
18. *Хованский Г.С.* Номография и ее значение сегодня. М.: ВЦ АН СССР, 1984. 24 с.
19. *Хованский Г.С.* Некоторые методы приближенного номографирования. М.: ВЦ АН СССР, 1985. 54 с.
20. *Чибисов В.В.* Автоматизация построения номограмм и графиков функций. Дис. ... канд. физ.-матем. наук. М.: ВЦ АН СССР, 1972. 147 с.
21. *Хованский Г.С.* Методы номографирования и их приложения. Дис. ... доктора техн. наук. М.: ВЦ АН СССР, 1962, 208 с. Сборник номограмм для расчета синхронной работы автогенераторов. М.: ВЦ АН СССР, 1975. 29 с., 72 номограммы.
22. *Хованский Г.С.* Первая международная конференция по номографии // Вестник АН СССР, 1960. № 1, С. 70-71.
23. *Смирнов С.В., Хованский Г.С.* Третья международная конференция по конструктивной начертательной геометрии // Вестник АН СССР, 1969. № 2, С. 91.
24. *Чорбаджиев Д.П.* Некоторые вопросы эффективного применения номограмм с ориентированным транспарантом. Дис. ... канд. физ.-матем. наук. М.: МГУ, 1966. 131 с.
25. *Schwarz E.* Nomogramme und andere Rechenhilfsmittel für der Ingenieur. Berlin: VEB Verlag Technik, 1960. 14 p., 32 Nomogramme.

26. Борисов С.Н. Номографические методы решения некоторых задач по расчету газопроводных сетей. Дис. ... канд. техн. наук. М.: ВЦ АН СССР, 1969. 120 с.
27. Лаптева Д.Г. Методы номографирования одного класса функций нескольких комплексных переменных и некоторые их приложения. Дис. ... канд. физ.-матем. наук. М.: ВЦ АН СССР, 1972. 122 с.
28. Гусев С.И. Определение оптимальных параметров оросительных систем номографическими методами. Дис. ... канд. техн. наук. М.: ВНИИГнМ, 1973. 173 с.
29. Борисов С.Н. Методы машинной номографии и их применения. Дис. ... доктора техн. наук. М., 1985.
30. Хованский Г.С. Номография сегодня. М.: ВЦ АН СССР, 1990.
31. Козлова Е.Г., Хованский А.Г., Хованский Г.С. Некоторые вопросы теоретической и практической номографии. М.: ВЦ РАН, 1996. 96 с.
32. Гусев С.И., Козлова Е.Г., Хованский Г.С. Примеры номограмм для решения экстремальных задач. М.: ВЦ РАН, 1997. 98 с.
33. Борисов С.Н. Алгоритмы конструирования номограмм. М.: ВЦ РАН, 1999. 134 с.
34. Борисов С.Н., Гусев С.И., Лаптева Д.Г., Хованский Г.С. Атлас номограмм. М.: ВЦ РАН, 2000. 76 с.
35. Борисов С.Н., Ляшенко О.Н. Номографические методы нахождения начальных приближений при решении некоторых нелинейных уравнений. Алгоритмы конструирования номограмм. М.: ВЦ РАН, 2001. 84 с.
36. Г.С. Хованский. Пятьдесят лет в номографии. М.: ВЦ РАН, 2004. 120 с.
37. Борисов С.Н. Номография для инженеров. М.: ВЦ РАН, 2005. 120 с.

### Сектор специальных функций

С 1992 г. по 1996 г. зав. сектором специальных функций в отделе научно-технической информации был А.П. Прудников (1927–1999).

А.П. Прудников работал в Вычислительном центре АН СССР, где он прошел путь от младшего научного сотрудника до доктора наук, профессора, заведующего отделом. В 1957 г.



А.П. Прудников

Анатолий Платонович защитил кандидатскую диссертацию “Аналитические исследования процессов тепло- и массообмена”, а в 1968 г. — докторскую диссертацию “Об одном классе интегральных преобразований типа Вольтерра и некоторых обобщениях операционного исчисления”. Его научные интересы сформировались в области прикладной математики под влиянием В.А. Диткина. В результате совместной деятельности в 1958 г. вышла в свет их первая монография, посвященная операционному исчислению по двум переменным, сыгравшая определенную роль в развитии этого направления.

В области классической проблематики операционного исчисления А.П. Прудниковым построена теория некоторых классов дифференциальных, в том числе обобщенных бесселевых, и разностных операторов, существенно расширившая круг задач, разрешимых операторными методами. Эти исследования получили широкое признание как в СССР, так и за рубежом, и заслуженно были отмечены Государственной премией СССР в 1978 г. совместно с В.А. Диткиным и В.П. Масловым.

Международную известность получили работы А.П. Прудникова по интегральным преобразованиям и специальным функциям, подытоженные в созданном им совместно со своими учениками фундаментальном руководстве “Интегралы и ряды” в пяти томах общим объемом около 400 печатных листов, значительно перекрывающем известный в этой области цикл книг Бейтмена-Эрдейи (соавторы: Ю.А. Брычков, О.И. Маричев). В совокупности эти пять томов являются незаменимым пособием для каждого исследователя и специалиста — математика, физика, инженера, применяющего методы математического анализа.

А.П. Прудникову принадлежат результаты по разработке аналитических и численных методов решения граничных задач для уравнения Лапласа в областях специального вида, к которым



приводит оптимизация ряда конкретных физических задач (оптимизация профилей проката, крутильные колебания валов, кручение призматических стержней со сложным профилем поперечного сечения).

А.П. Прудников являлся руководителем и исполнителем проводимых в Государственном научно-исследовательском испытательном институте авиационной и космической медицины МО РФ работ в области медицинской информатики. В результате создан комплекс математических моделей, алгоритмов, программ и номограмм, предназначенных для применения в медицинских исследованиях и позволяющих проводить оценку иерархических уровней профессионального здоровья летного состава и оценку уровней радиационного и электромагнитного загрязнения окружающей среды.

А.П. Прудников — автор и соавтор около 100 научных работ, в том числе 10 книг, переизданных в Англии, Германии, Польше, Франции, США, Японии. Среди его учеников 15 кандидатов и два доктора наук.

Анатолий Платонович отдавал много сил административной и общественной деятельности. С 1975 г. по 1987 г. он работал заместителем начальника отдела естественных наук ВАК СССР, продолжая по совместительству работу в ВЦ РАН. Это было сложное время перестройки системы аттестации научно-педагогических кадров и обостренной борьбы математических школ. На этой работе он в полной мере проявил сочетание принципиальности с доброжелательностью и порядочностью. В последнее время он возглавлял Экспертный совет ВАК России по математике и механике.

А.П. Прудников — основатель и до последних дней жизни главный редактор международного журнала “Integral Transforms and Special Functions”, редактор международной серии монографии “Analytical Methods and Special Functions”. Благодаря его энергии и способностям был организован научный коллектив, в который входят академик РАН В.А. Ильин, академик РАН Е.И. Моисеев, к. ф.-м.н. Ю.А. Брычков и широкий круг специалистов в области интегрального исчисления, сотрудничающих в редакционной группе журнала.

При подготовке материала о А.П. Прудникове использовалась статья в журнале “Дифференциальные уравнения”, 1997, т. 33, № 6, с. 73–76.

### Список научных работ А.П. Прудникова

1. Решение в интегральной форме одной смешанной задачи для системы двух дифференциальных уравнений параболического типа // Докл. АН СССР. 1957. Т. 115, № 5. С. 869–871.
2. Решение некоторых задач теории молекулярного переноса для тел простейшей геометрической формы // Изв. АН СССР. Отд. техн. наук. 1957. № 8. С. 143–145.
3. Решение одной смешанной краевой задачи теории термодиффузии // Докл. АН СССР. 1958. Т. 120, № 2. С. 249–251.
4. К исследованию тепло- и массообмена в дисперсных средах // ИФЖ. 1958. Т. 1, № 4. С. 81–86.
5. Аналитическое исследование процессов тепло- и массообмена при конвективной сушке // Изв. АН СССР. Отд. техн. наук. 1958. № 10. С. 63–67.
6. К исследованию явлений переноса тепла и вещества в пористых средах (совм. с А.В. Лыковым) // Докл. АН БССР. 1958. Т. 2. № 8. С. 334–337.
7. К исследованию процессов тепло- и массообмена при прогреве и сушке топлива в энерготехнологических установках // Весці АН БССР. Сер. фіз.-тэхн. навук. 1958. № 3. С. 11–23.
8. Операционное исчисление по двум переменным и его приложения (совм. с В.А. Диткиным). М.: Физматгиз, 1958. 178 с.
9. К теории фильтрации жидкости в грунтах // Изв. АН СССР. Энергетика и автоматика. 1959. № 1. С. 119–121.
10. Об одной задаче теплопроводности // ИФЖ. 1960. Т. 3, № 5. С. 136–137.
11. О функциях, удовлетворяющих дифференциальному уравнению  $y'' \pm 2xy' \pm 2ny = 0$  (совм. с О.С. Берляндом и Р.И. Гавриловой) // ИФЖ. 1960. Т. 3, № 9. С. 103–107.
12. Таблицы интегральных функций ошибок и полиномов Эрмита (совм. с О.С. Берляндом и Р.И. Гавриловой). Минск: Изд-во АН БССР. 1961. 164 с.
13. Интегральные преобразования и операционное исчисление (совм. с В.А. Диткиным). М.: Физматгиз, 1961. 524 с.
14. К теории операционного исчисления // Докл. АН СССР. 1962. Т. 142, № 4. С. 794–797.

15. О функциях, удовлетворяющих дифференциальному уравнению  $x^2 y''' + 3xy'' + y' + x^2 y = 0$  // Докл. АН СССР. 1962. Т. 144. № 1. С. 56–57.
16. Операционное исчисление операторов Бесселя (совм. с В.А. Диткиным) // Журн. вычислит. матем. и мат. физики. 1962. Т. 2, № 6. С. 997–1018.
17. Operational calculus in two variables and its applications (совм. с В.А. Диткиным). London: Pergamon Press, 1962. 167 p.
18. Tables of integral error functions and Hermite polynomials (совм. с О.С. Берляндом и Р. И. Гавриловой). London: Pergamon Press, 1962. 163 p.
19. К теории операционного исчисления, порожденного уравнением Бесселя (совм. с В.А. Диткиным) // Журн. вычислит. матем. и мат. физики. 1963. Т. 3, № 2. С. 223–238.
20. Об операционном исчислении функций целочисленного аргумента и некоторых его приложениях в дискретном анализе (совм. с В.А. Диткиным) // ИФЖ. 1964. Т. 7, № 7. С. 101–115.
21. Przekształcenia całkowite i rachunek operatorowy (совм. с В.А. Диткиным), Warszawa: PWN, 1964. 343 s.
22. Integral Transforms and Operational Calculus (совм. с В.А. Диткиным). London: Pergamon Press, 1965. 526 p.
23. Справочник по операционному исчислению (совм. с В.А. Диткиным). М.: Высш. шк. 1965. 466 с.
24. Операционное исчисление (совм. с В. А. Диткиным). М.: Высш. шк. 1966. 404 с.
25. Операционное исчисление (совм. с В. А. Диткиным) // Итоги науки и техники. Мат. анализ. М., 1966. С. 7–75.
26. Операционное исчисление функций двух целочисленных переменных и его приложения в дискретном анализе // IV Internationaler Kongress über Anwendungen der Mathematik in den Ingenieurwissenschaften. Berichte-Reports-Rapports-Doklady. Teil II, Angewandte Mathematik. Berlin, 1967. S. 158–159.
27. Formulaire pour le Calcul Operationnel (совм. с В.А. Диткиным). Paris: Masson & Cie, Editeurs, 1967. 472 p.
28. Об одном методе введения конечных частей расходящихся интегралов и их приложениях в операционном исчислении (совм. с В.А. Диткиным) // Дифференц. уравнения. 1967. Т. 3, № 10. С. 1772–1781.
29. Интегральные преобразования (совм. с В.А. Диткиным) // Итоги науки и техники. Мат. анализ. М., 1967. С. 7–82.
30. О билинейных разложениях, содержащих многочлены Лежандра // Докл. АН БССР. 1968. Т. 12, № 2. С. 119–122.
31. О существовании особых точек у функций, представимых интегралом Лапласа // Докл. АН БССР. 1968. Т. 12, № 3. С. 243–247.
32. Operational Calculus (совм. с В.А. Диткиным) // Progress in Mathematics. New York: Plenum Press. 1968. Vol. 1. P. 1–74.
33. Integral Transforms (совм. с В.А. Диткиным) // Progress in Mathematics. New York: Plenum Press. 1969. Vol. 4. P. 1–86.
34. К теории операционного исчисления // Докл. АН БССР. 1969. Т. 13, № 3. С. 222–224.
35. Операционное исчисление функций двух целочисленных переменных и некоторые его приложения (совм. с В.А. Диткиным) // ИФЖ. 1969. Т. 17, № 4. С. 697–708.
36. Виталий Арсеньевич Диткин (совм. с А.А. Дородницыным, М.А. Лаврентьевым, Л.А. Люстерником) // Успехи мат. наук. 1970. Т. 25, № 5. С. 253–258.
37. К теории операционного исчисления // Проблемы тепло- и массопереноса. М.: Энергия, 1970. С. 317–322.
38. Operational calculus of a class of generalized Bessel operators // Symposium on operational calculus and generalized functions. Dubrovnik, Jugoslavija, 1971. P. 3–11.
39. Операционное исчисление некоторых дифференциальных операторов (совм. с В.А. Диткиным) // Проблемы прикл. математики и механики. М.: Наука, 1971. С.75 –85.
40. Об одном способе построения операционного исчисления (совм. с В.А. Диткиным) // ИФЖ. 1973. Т. 24, № 6. С. 1114–1117.
41. Интегральные преобразования и операционное исчисление (совм. с В.А. Диткиным). Изд. 2-е доп. М.: Наука, 1974. 544 с.
42. Операционное исчисление (совм. с В.А. Диткиным). Изд. 2-е доп. М.: Выс. шк., 1975. 407 с.
43. Об одном приближенном методе решения интегрального уравнения теории переноса (совм. с М.И. Журиной и А.М. Поповой) // ИФЖ. 1976. Т. 31, № 1. С. 111–115.

44. Численное решение одного интегрального уравнения квантовой механики методом Паде (совм. с М.И. Журиной и А.М. Поповой) // Цепные дроби и их применения. Киев: ИМ АН УССР. 1976. С. 51–52.
45. Об одном классе кратных интегралов теории переноса (совм. с М.И. Журиной и А.М. Поповой) // ИФЖ. 1976. Т. 31, № 3. С. 550–553.
46. Ватсона преобразование // Мат. энцикл. 1977. Т. 1. С. 610.
47. Вебера функция // Мат. энцикл. 1977. Т. 1. С. 612.
48. Интегральные преобразования обобщенных функций (совм. с Ю.А. Брычковым). М.: Наука, 1977. 288 с.
49. Операционное исчисление (совм. с Ю.А. Брычковым и В.С. Шишовым) // Итоги науки и техники. Мат. анализ. М., 1978. Т. 16. С. 99–148.
50. Transformations intégrales et calcul opérationnel (совм. с В.А. Диткиным). Moscou: Mir, 1978. 435 p.
51. Calcul opérationnel (совм. с В.А. Диткиным). Moscou: Mir, 1979. 439p.
52. Применение операторов Ватсона к решению некоторых задач теории теплопроводности (совм. с М.А. Бартошевич) // ИФЖ. 1979. Т. 37, № 3. С. 503–507.
53. Операторы Ватсона и их применение к решению некоторых задач теории теплопроводности // Численные методы решений уравнений баланса (Берлин, 20–25 окт. 1980 г.): Доклады, 1980. С. 79–82.
54. Операторы Ватсона и некоторые их приложения (совм. с М.А. Бартошевич) // Обобщенные функции и их применения в математической физике. М., 1981. С. 430–434.
55. О некоторых формулах операционного исчисления (совм. с Ю.А. Брычковым) // ИФЖ. 1981. Т. 41. С. 727–729.
56. Интегралы и ряды. Элементарные функции (совм. с Ю.А. Брычковым и О.И. Маричевым). М.: Наука, 1981. 798 с.
57. Асимптотика решений некоторых краевых задач для уравнения Лапласа при деформировании области (совм. с В.И. Власовым) // Итоги науки и техники. Современные проблемы математики. М., 1982. Т. 20. С. 3–36.
58. Интегральные преобразования обобщенных функций (совм. с Ю.А. Брычковым) // Итоги науки и техники. Мат. анализ. 1982. Т. 20. С. 79–115.
59. Transformations integrales et calcul opérationnel. Sec. editions (совм. с В.А. Диткиным). Moscou: Mir, 1982. 435 p.
60. Calcul opérationnel. Sec. editions (совм. с В.А. Диткиным). Moscou: Mir, 1983. 439 p.
61. Интегральные преобразования обобщенных функций (совм. с Ю.А. Брычковым). Баку: Маариф, 1983. 398 с.
62. Интегралы и ряды. Специальные функции (совм. с Ю.А. Брычковым и О.И. Маричевым). М.: Наука, 1983. 750 с.
63. О некоторых формулах операционного исчисления по двум переменным (совм. с Ю.А. Брычковым) // ИФЖ. 1983. Т. 44, № 5. С. 814–818.
64. Asymptotic behavior of the solutions of certain problems for the Laplace equation under the deformation of the domain (совм. с В.И. Власовым) // J. Soviet Math, 1984. V. 25, № 5. P. 1351–1379.
65. Цилиндрические функции (совм. с Л.Н. Кармазиной) // Мат. энцикл. 1985. Т. 5. С. 820–825.
66. Таблицы неопределенных интегралов (совм. с Ю.А. Брычковым и О.И. Маричевым). М.: Наука, 1986. 192 с.
67. Метод решения краевых задач для уравнения Лапласа в областях с криволинейной границей (совм. с В.И. Власовым) // Мат. весн. 1986. Т. 38. С. 617–623.
68. The Dirichlet problem for  $L$ -type domain (совм. с В.И. Власовым и Д.Б. Волковым) // Complex Analysis and Applications. Sofia, 1986. P. 743–754.
69. The Dirichlet problem for a circle with two notches (совм. с В.И. Власовым и Д.Б. Волковым) // Complex Analysis and Applications. Sofia, 1986. P. 755–761.
70. Torsional oscillations of the shaft with longitudinal notch (совм. с В.И. Власовым и Д.Б. Волковым) // Complex Analysis and Applications. Sofia, 1986. P. 762–766.
71. Интегралы и ряды. Дополнительные главы (совм. с Ю.А. Брычковым и О.И. Маричевым). М.: Наука, 1986. 800 с.
72. Метод решения краевых задач для уравнения Лапласа в областях с криволинейной границей (совм. с В.И. Власовым) // Second International Symposium. Complex Analysis and Applications. Budva, 1986. P. 23.

73. Integrals and Series. Vol. 1: Elementary Functions (совм. с Ю.А. Брычковым и О.И. Маричевым). New York: Gordon and Breach Publishers, 1986. 802 p.
74. Integrals and Series. Vol. 2: Special Functions (совм. с Ю.А. Брычковым и О.И. Маричевым). New York: Gordon and Breach Publishers, 1986. 754 p.
75. Решение задачи Дирихле в области с границей, содержащей скругленный угол (совм. с В.И. Власовым и Д.Б. Волковым) // Zeitschrift für Analysis und ihre Anwendungen. 1987. Bd 6(1). S. 61–73.
76. О некоторых формулах операционного исчисления для ступенчатых функций (совм. с Ю.А. Брычковым) // ИФЖ. 1987. Т. 52, № 6. С. 999–1003.
77. Решение некоторых краевых задач в областях с криволинейной границей (совм. с В.И. Власовым) // Проблемы прикладной математики и информатики. М.: Наука, 1987. С. 169–186.
78. Tables of Indefinite Integrals (совм. с Ю.А. Брычковым и О.И. Маричевым). New York: Gordon and Breach Publishers, 1989. 192 p.
79. Integral Transforms of Generalized Functions (совм. с Ю.А. Брычковым). New York: Gordon and Breach Publishers, 1989. 343 p.
80. Вычисление интегралов и преобразование Меллина (совм. с Ю.А. Брычковым и О.И. Маричевым) // Итоги науки и техники. Мат. анализ. 1989. Т. 27. С. 3–146.
81. Виталий Арсеньевич Диткин // Аналитические и численные методы решения задач математической физики. М.: ВЦ АН СССР, 1989. С. 5–13.
82. О комплексе алгоритмов и программ для решения одного класса краевых задач (совм. с Н.Ю. Владимировой, В.И. Власовым, Д.Б. Волковым и Е.А. Яковлевой) // Аналитические и численные методы решения задач матем. физики. М.: ВЦ АН СССР, 1989. С. 71–80.
83. Integrals and Series (совм. с Ю.А. Брычковым и О.И. Маричевым). Vol. 3: More Special Functions. New York: Gordon and Breach Publishers, 1990. 820 p.
84. On Watson Transform // College of Eng. Nihon Univers., Fractional Calculus and its Applications: International (Tokyo) Conference, Proc., 1990. P. 185–190.
85. Integrals and Series. Elementary Functions (in Japanese) (совм. с Ю.А. Брычковым и О.И. Маричевым). Tokyo: Maruzen Co. Ltd., 1991. 799 p.
86. Evaluation of Integrals and the Mellin Transform (совм. с Ю.А. Брычковым и О.И. Маричевым) // J. Soviet Math. 1991. Vol. 54, № 6. P. 1239–1341.
87. Операционное исчисление совершенных операторов (совм. с И.И. Рябцевым). М.: ВЦ АН СССР, 1991. 126 с.
88. Операционное исчисление совершенных операторов (специальные разделы) (совм. с И.И. Рябцевым). М.: ВЦ РАН, 1992. 99 с.
89. Integrals and Series. Special Functions (in Japanese) (совм. с Ю.А. Брычковым и О.И. Маричевым). Tokyo: Maruzen Co. Ltd., 1992. 751 p.
90. Tafeln unbestimmter Integrale (совм. с Ю.А. Брычковым и О.И. Маричевым). Thun und Frankfurt/Main: Verlag Harri Deutsch, 1992. 200 S.
91. Integrals and Series. Vol. 4: Direct Laplace Transforms (совм. с Ю.А. Брычковым и О.И. Маричевым). New York: Gordon and Breach Publishers, 1992. 619 p.
92. Integrals and Series. Vol. 5: Invers Laplace Transforms (совм. с Ю.А. Брычковым и О.И. Маричевым). New York: Gordon and Breach Publishers, 1992, 595 p.
93. Multidimensional Integral Transformations (совм. с Ю.А. Брычковым, Х-Ю. Глеске и Ву Ким Туаном). Philadelphia: Gordon and Breach Publishers, 1992. 386 p.
94. Orthogonal Polynomials with ultra-exponential weight functions // J. of Comput. and Appl. Mathem. 1993. Vol. 48. P. 239–241.
95. On a complete orthonormal system of special functions (совм. с Е.И. Моисеевым) // J. of Comput. and Appl. Math. 1993. Vol. 49. P. 201–206.
96. The Wiener orthonormal system and related orthogonal polynomials (совм. с Е.И. Моисеевым) // Bull. of the Polish Acad. Sci. Mathem. 1994. Vol. 42, № 2. P. 141–148.
97. On the continuation of the ideas of Heaviside and Mikusinski in operational calculus // Dissertationes Mathematicae, 1995. № 340. P. 237–287.
98. On the Basis property of systems of sines and cosines in the Sobolev spaces (совм. с Е.И. Моисеевым) // Bull. of the Polish Acad. Sci. Mathem. 1996. Vol. 44, № 4. P. 401–409.
99. О проблеме Эйлера суммирования гармонических рядов // Интегр. преобразования и спец. функции: Информ. бюлл. ВЦ РАН. 1996. Т. 1, № 1. С. 5–7.
100. Об одной замечательной системе ортогональных многочленов // Интегр. преобразования и спец. функции: Информ. бюлл. ВЦ РАН. 1996. Т. 1, № 1. С. 24.

### Направления и результаты деятельности отдела научной информации в последние годы

**В области краевых задач, специальных функций** рассматриваются вопросы математического моделирования, методы вычислительной и прикладной математики и их применение к фундаментальным исследованиям в различных областях знаний.

Под руководством академика РАН В.А. Ильина исследуются вопросы полноты и базисности некоторых систем функций специального вида в конкретных функциональных пространствах, развивается метод совершенных операторов и его приложения к задачам анализа и математической физики.

Разрабатываются алгоритмы компьютерной алгебры для интегрирования, суммирования и преобразования специальных функций (Ю.А. Брычков).

В 1996–1998 гг. велись работы в плане научного сотрудничества между РАН и Польской академии наук по теме: “Интегральные преобразования и специальные функции”.

Под руководством академика РАН Е.И. Моисеева в ВЦ РАН издаются Информационный бюллетень “Интегральные преобразования и специальные функции” и международный научный журнал “Integral Transforms and Special Functions”.

Исследуются вопросы построения корректных математических моделей (с использованием вариационной формулировки) деформированных сред с масштабными эффектами, математического и численного моделирования межфазных слоев в неоднородных структурах.

В рамках европейских проектов Международного научно-технического центра разрабатываются математические комбинированные модели механики сплошных сред, учитывающие масштабные эффекты (С.А. Лурье).

**В области развития методов номографирования** выполнялся ряд работ по построению приближенных циркульных номограмм для функций многих переменных, разрабатывались методы построения точных и приближенных номограмм с повторением вспомогательной переменной, разрабатывалась теория преобразования номограмм из выровненных точек в номограммы с ориентированным транспарантом, несущим криволинейный индекс, и в номограммы из равноудаленных точек. Строились рабочие номограммы для решения экстремальных задач. Велись совместные проекты с Военно-медицинской академией по квалиметрии жизни (С.А. Борисов, С.И. Гусев, Н.П. Тучкова).

**В области информационного обеспечения научного коллектива РАН** проводились исследования по созданию и развитию информационных ресурсов для фундаментальных исследований.

Под руководством С.И. Гусева проводится работа по информационному обеспечению научных сотрудников совместно с библиотекой ВЦ РАН и поддержке справочно-информационного фонда библиотеки ВЦ РАН.

Осуществлялось методическое руководство по тематике ВЦ РАН для отделов комплектования БЕН РАН и формирование библиотечного фонда ВЦ РАН и работа с пользователями научно-технической информации (А.А. Муромский).

Разрабатывалась методика для подготовки данных для научной цифровой библиотеки и создания форматов для электронных научных публикаций (Н.П. Тучкова).

Научным коллективом отдела разрабатывается структура и состав тезауруса по обыкновенным дифференциальным уравнениям (под ред. академика Е.И. Моисеева).

Можно отметить следующие результаты, полученные в последнее время в области **краевых задач и спецфункций**.

Разработаны алгоритмы компьютерной алгебры для интегрирования, суммирования и преобразования специальных функций.

Исследованы проблемы граничного управления процессом колебаний на одном или двух концах струны. Рассмотрена задача о полном успокоении колебательного процесса.

Изучена проблема граничного управления на одном конце процессом колебаний, описываемым волновым уравнением и протекающим за промежуток времени  $0 \leq t \leq T$ , при условии, что второй конец закреплен. Устанавливаются необходимые и достаточные условия существования граничного управления  $u(0, t) = \mu(t)$ , обеспечивающего переход колебательного процесса из

начального заданного состояния в заданное конечное состояние. Рассмотрен также вопрос об управлении на двух концах.

Получена априорная оценка решения краевой задачи для параболо-гиперболического уравнения в банаховом пространстве функций суммируемых со степенью, меньшей трех. Показано, что такая оценка при степени, большей трех, уже несправедлива. Ранее аналогичные оценки были получены только в гильбертовых пространствах.

Изучена базисность биортогональной системы синусов в весовом пространстве, рассмотрен вопрос о представлении функции в интеграл по функции Неймана, изучена разрешимость одной нелокальной краевой задачи для вырождающегося эллиптического уравнения.

Для эллиптического уравнения  $u_{xx} + u_{yy} = 0$  в полуполосе  $0 < x < 1, y > 0$  доказана однозначная разрешимость следующей нелокальной краевой задачи:  $u(x, 0) = f(x), u(0, y) = u(1, y), u_x(0, y) = 0$ .

Доказана базисность в пространстве функций, суммируемых с любой степенью, большей единицы, собственных функций задачи о колебаниях нагруженной струны или крыла самолета. В частности, исследована и равномерная сходимость разложения по собственным функциям.

Установлены теоремы единственности как решения почти всюду, так и обобщенного решения с конечной энергией смешанной задачи для волнового уравнения в прямоугольнике  $(0 \leq x \leq l) \times (0 \leq t \leq T)$  для любого  $T > 0$  и для граничных условий вида  $u(0, t) = \mu(t), u(l, t) - \sum_{k=1}^n \alpha_k(t)u(\xi_k, t) = \nu(t)$  при  $0 \leq t \leq T$ , где  $0 < \xi_1 < \xi_2 < \dots < \xi_n < l$ , а  $\alpha_k(t)$  — произвольные функции.

В терминах обобщенного решения волнового уравнения с конечной энергией полностью выяснен вопрос о необходимых и достаточных условиях существования и о явном аналитическом представлении граничного управления на двух концах струны  $u(0, t) = \mu(t), u(l, t) = v(t)$ , обеспечивающих за произвольный промежуток времени  $T > 0$  переход колебательного процесса из начального состояния  $\{u(x, 0) = \varphi(x), u_t(x, 0) = \psi(x)\}$  в состояние  $\{u(x, T) = \varphi_1(x), u_t(x, T) = \psi_1(x)\}$ , где  $\varphi, \varphi_1, \psi, \psi_1$  — произвольные функции из классов  $\varphi, \varphi_1 \in W_2^2(0, l), \psi, \psi_1 \in L_2(0, l)$ .

Аналогичные результаты получены для случая, когда один конец струны закреплен, а управление ведется на втором конце.

Для этих процессов в терминах обобщенного решения, допускающего существование конечной энергии, определен минимальный промежуток времени  $T$  и найдены и предъявлены в явном аналитическом виде граничные управления, которые за этот промежуток времени переводят процесс из произвольного начального состояния  $\{U(x, 0) = \varphi(x), U_t(x, 0) = \psi(x)\}$  в произвольно заданное финальное состояние  $\{U(x, T) = \varphi_1(x), U_t(x, T) = \psi_1(x)\}$ .

Доказано, что промежуток времени  $T = 2l$  является наименьшим промежутком, за который при совершенно произвольных четырех функциях  $\varphi(x), \psi(x), \varphi_1(x), \psi_1(x)$ , принадлежащих классам  $\varphi, \varphi_1 \in W_2^1, \psi, \psi_1 \in L_2$ , существует граничное управление на двух концах, переводящее процесс, описываемый телеграфным уравнением, из начального состояния  $u(x, 0) = \varphi(x), u_t(x, 0) = \psi(x)$  в финальное состояние  $u(x, T) = \varphi_1(x), u_t(x, T) = \psi_1(x)$ , и предъявлено явное аналитическое выражение этих граничных управлений.

Установлено, что промежуток времени  $T = 2R$  является наименьшим промежутком, за который для совершенно произвольных четырех функций  $\varphi(r), \psi(r), \varphi_1(r), \psi_1(r)$ , принадлежащих классам  $\varphi, \varphi_1 \in W_2^1, \psi, \psi_1 \in L_2(0, R)$ , существует граничное управление, переводящее процесс радиально-симметричных колебаний круглой мембраны из начального состояния  $u(r, 0) = \varphi(r), u_t(r, 0) = \psi(r)$  в финальное состояние  $u(r, T) = \varphi_1(r), u_t(r, T) = \psi_1(r)$ , и предъявлено явное аналитическое выражение этого граничного управления.

Продолжено изучение задач граничного управления процессами, описываемыми уравнением с переменным коэффициентом

$$k(x)[k(x)U_x(x, t)]_x - U_{tt}(x, t) = 0,$$

и телеграфным уравнением.

В области **краевых задач механики сплошных сред** в последнее время получены следующие основные результаты.

Построена модель деформированных сред, учитывающая масштабные эффекты и пригодная для описания деформирования тонких структур и наноразмерных объектов.

Построены модели сплошных сред с интегрируемым и неинтегрируемым полем тензора деформаций, позволяющие описывать новый тип внутренних взаимодействий с быстрым изменением по координатам, характерным для межатомных взаимодействий, и поверхностные эффекты в средах.

Разработана модель когезионного поля, построена модель деформирования тонких однородных структур.

Предложен класс моделей механики сплошной среды с нарушением гладкости кинематических переменных и алгоритм построения разрывных моделей. Это актуально, например, при моделировании мелкодисперсных сред.

Доказано наличие определенной иерархии в моделях с поврежденностью. Рассмотрен простейший класс “разрывных” моделей, частным случаем которого являются:

- модель Коссера с векторным полем “спинов”, не связанных с ротором вектора перемещений;
- модель кавитации со скалярным полем “разрыхления”, не связанным с дивергенцией поля перемещений;
- класс комбинированных моделей турбулентности и кавитации.

Впервые построены модели обобщенных сред Коссера и доказана возможность связности дефектов турбулентности и кавитации, что дает теоретическое обоснование возможности управления турбулентностью.

Предложена модель среды с учетом когезионных взаимодействий, построенная как частный случай общей модели с масштабными эффектами. Эти взаимодействия (частный случай масштабных эффектов) описываются с помощью единственной дополнительной константы  $C$ , определяющей характерный размер локальных когезионных полей. Дана полная математическая формулировка среды: сформулированы физические уравнения и краевые задачи в трехмерной, двумерной и одномерной постановке.

Моделируется деформирование тонких пленок на основе двух вариантов неклассических моделей механики сплошных сред, учитывающих масштабные эффекты. Приводится сравнение результатов. Первая модель, так называемая “базисная”, предложена на предыдущих этапах работы. Она описывает упругие взаимодействия, аналогичные взаимодействиям, определяемым распределенными по объему винклеровскими пружинками с некоторой жесткостью. Вторая модель — “модель когезионного поля”, является модифицированным вариантом моментных теорий. Наряду с кривизнами, порождаемыми производными от вектора поворотов, в лагранжиане учитываются кривизны, связанные с производными шарового тензора деформаций.

Рассмотрены конкретные примеры моделирования.

Исследована задача о трещине нормального отрыва в двухмерной биплоской постановке. Дана трактовка локального поля (тонкой структуры) как когезионного поля Баренблата. Установлена связь новой физической постоянной с параметрами механики разрушения: критическим раскрытием трещины, длиной зоны Баренблата и удельной поверхностной энергией.

Исследована задача растяжения составной системы в рамках одномерной постановки для модели когезионного поля. Показано, что когезионное поле в зоне контакта различных фаз может трактоваться как межфазный слой. Его свойства полностью определяются свойствами фаз.

Проведено численное параметрическое исследование деформации составных тонких систем в рамках двумерной биплоской постановки. Моделируется эффект “разгрузки” слабого слоя и дополнительного увеличения жесткости составного элемента, связанный с учетом когезионных полей. Показано, что учет когезионных взаимодействий приводит к эффекту уменьшения концентрации энергии деформации в “слабом” элементе с меньшей жесткостью.

Приводится постановка и решение задачи о деформировании пленки под действием внешних воздействий. Такая задача актуальна в связи с эффектом “осыпания” при тиснении рельефа на голографических фольгах.

Исследованы некоторые классы моделей композиционных материалов.

В области информационного обеспечения фундаментальных исследований сотрудников ВЦ РАН можно отметить следующие основные результаты.

Ведутся работы по подготовке “УКАЗАТЕЛЯ” трудов сотрудников ВЦ РАН. Реализована электронная версия “УКАЗАТЕЛЯ” совместно с отделом систем математического обеспечения (зав. отд. В.А. Серебряков) и отделом программного сопровождения (зав. отд. М.А. Копытов).

Сотрудниками отдела проводилась научно-информационная работа в рамках функционирования библиотеки ВЦ РАН, велась работа по линии книгообмена с отечественными информационными центрами.

Разработана технология сопровождения информационной системы института РАН: внедрены методики сопровождения научных публикаций института РАН на примере ВЦ. В рамках проекта разработаны форматы для представления научных публикаций в ИСИР (Интегрированная система информационных ресурсов), а также для представления вторичной информации о публикациях в сети в виде аннотированного библиографического отчета института. На основе технологической цепочки с использованием представленных выше форматов данных в ИСИР появился раздел заявок, поступивших в издательство ВЦ РАН. Проведено опробирование системы информационного сопровождения редакционно-издательской группы отдела научной информации ВЦ РАН — от заявки научной публикации в план издательства до научного отчета института. Разработана концепция и рабочая версия системы сопровождения научных публикаций с web-интерфейсом и авторизацией доступа разного уровня. Для авторов опубликованы и размещены в сети инструкции по подготовке заявок и полных текстов научных публикаций.

За текущий период разработана структура указателя трудов научного коллектива академического института на примере ВЦ РАН. Структура указателя позволяет получить представление о научных достижениях коллектива института в целом и индивидуальный вклад каждого члена научного коллектива.

Реализована система сбора научной информации — от заявки в план издательства — до аннотированного библиографического справочника и отчета института РАН. Весь этот путь научной публикации в сети реализуется на базе интегрированной системы информационных ресурсов. Методика информационного наполнения указателя основана на использовании web-форм для редактирования вторичной информации о научных публикациях на базе расширенной модели метаданных. Опубликованы “УКАЗАТЕЛИ” трудов сотрудников ВЦ РАН, начиная с 2000 г. Реализуются HTML версии указателей.

Разработана технология подготовки и сбора данных о научных публикациях сотрудников ВЦ РАН для электронного “УКАЗАТЕЛЯ” в рамках интегрированной системы информационных ресурсов. Результаты проводимых работ докладывались на Всероссийской и международной конференциях и рекомендованы в системе РАН. Проводилось согласование форматов представления информации о научных публикациях в сети ИНТЕРНЕТ.

### **Некоторые актуальные публикации отдела научной информации по основным направлениям деятельности**

**1998**

1. *Moiseev E.I.* On spectral problem for the Tricomy equation // Works of the international conference “Tricomi's ideas and contemporary applied mathematics”, Roma, 1998.
2. *Моисеев Е.И.* О базисности систем синусов и косинусов в весовых пространствах // Дифференц. уравнения. 1998. Т. 34, № 1. С. 40–44.
3. *Ильин В.А., Моисеев Е.И.* Оценка сверху взятой на диагонали спектральной функции для многомерного оператора Шредингера с потенциалом, удовлетворяющим условию Като // Дифференц. уравнения. 1998. Т. 34, № 3. С. 359–369.



4. Ильин В.А., Капустин Н.Ю. Об одной спектральной задаче для оператора Лапласа на квадрате со спектральным параметром в граничном условии // Дифференц. уравнения. 1998. Т. 34, № 5. С. 662–667.
5. Moiseev E.I., Prudnikov A.P., Skornik U. On the representation of functions in form of integrals of hypergeometric functions // Integral Transform and Special Functions. 1998. V. 6, № 1. P. 163–166.
6. Моисеев Е.И., Прудников А.П., Скурник У. О разложении функции в интеграл по вырожденным гипергеометрическим функциям // Дифференц. уравнения. 1998. Т. 34, № 6. С. 765–774.
7. Ильин В.А., Моисеев Е.И. Лекции по теории рядов и интегралов Фурье. М.: Изд-во МГУ, 1998. 50 с.
8. Борисов С.Н., Гусев С.И., Лаптева Д.Г., Тучкова Н.П., Хованский Г.С. и др. Экспресс-оценка электромагнитной обстановки с помощью номограмм. М.: ВЦ РАН, 1998. 72 с.
9. Лурье С.А., Белов П.А. Модели деформирования твердых тел и их аналоги в теории поля // Изв. РАН. Мех. тв. тела. 1998. № 3. С. 157–166.
10. Лурье С.А. The Description of the Active Composites with Shape Memory Materials // CSME FORUM 1998. The Mechanics of Solids and Materials Technology. Toronto. P. 185–192.
11. Лурье С.А., Полухина Н.О. Напряженное состояние в составной системе, содержащей активный элемент из сплава с памятью формы при прямом превращении // Механика композиционных материалов и конструкций. 1998. № 4(2). С. 108–124.

**1999**

1. Ильин В.А., Тихомиров В.В. Волновое уравнение с краевым управлением // Дифференц. уравнения. 1999. № 1. С. 137–138.
2. Ильин В.А., Тихомиров В.В. Волновое уравнение с граничным управлением на двух концах и задача о полном успокоении колебательного процесса // Дифференц. уравнения. 1999. № 5. С. 692–704.
3. Ильин В.А. Волновое уравнение с граничным управлением на двух концах за произвольный промежуток времени // Дифференц. уравнения. 1999. № 11.
4. Моисеев Е.И. Базисность в весовом пространстве одной системы собственных функций дифференциального оператора // Дифференц. уравнения. 1999. № 2. С. 200–205.
5. Моисеев Е.И., Скурник У. О представлении функции в интеграл по собственным функциям оператора Бесселя // Дифференц. уравнения. 1999. № 4. С. 480–489.
6. Моисеев Е.И. О решении спектральным методом одной нелокальной краевой задачи // Дифференц. уравнения. 1999. № 8. С. 1094–1100.
7. Гусев С.И., Лаптева Д.Г., Тучкова Н.П. и др. Квалиметрия жизни и отдаленные радиационные последствия Чернобыльской экологической катастрофы. М.: ВЦ РАН, 1999. 122 с.
8. Борисов С.Н. Алгоритмы конструирования номограмм. М.: ВЦ РАН, 1999. 134 с.
9. Лурье С.А., Яновский Ю.Г., Бабешко В.А., Образцов И.Ф. К теории тонких пленок // Изд-во РАН. Механика композиционных материалов и конструкций. 1999. Т. 5, № 2. С. 48–60.
10. Ефимов Д.А., Лурье С.А., Моисеев С.А. Деформация цилиндрических элементов из активных композитов, содержащих сплавы с памятью формы // Механика композиционных материалов и конструкций. 1999. № 3. С. 42–56.
11. Лурье С.А., Криволицкая И.И., Юсефи Шахрам. Моделирование изменения механических характеристик слоистых композитных материалов при циклических нагрузках // Конструкции из композиционных материалов. 1999. № 3. С. 90–97. М.: Изд-во ВИМИ, 1999

**2000**

1. Ильин В.А., Моисеев Е.И. О единственности решения смешанной задачи для волнового уравнения с нелокальными граничными условиями // Дифференц. уравнения. 2000. Т. 36, № 5. С. 656–661.
2. Капустин Н.Ю., Моисеев Е.И. О сходимости спектральных разложений функций из класса Гельдера для двух задач со спектральным параметром в граничном условии // Дифференц. уравнения. 2000. Т. 36, № 8. С. 1069–1074.
3. Капустин Н.Ю., Моисеев Е.И. О базисности в пространстве  $L_p$  систем собственных функций, отвечающих двум задачам со спектральным параметром в граничном условии // Дифференц. уравнения 2000. Т. 36, № 10. С. 1357–1360.
4. Ильин В.А., Моисеев Е.И. Лекции по теории рядов Фурье // Уч. пособие. М.: Изд-во МГУ, 2000. 52 с.
5. Ильин В.А. Сравнение бесконечно малых последовательностей и скоростей возрастания функций // Соросовский образовательный журнал. 2000. Т. 6. № 1. С. 120–127.

6. Ильин В.А. Граничное управление процессом колебаний на двух концах в терминах обобщенных решений волнового уравнения с конечной энергией // Дифференц. уравнения. 2000. Т. 36, № 11.
7. Ильин В.А. Граничное управление процессом колебаний на одном конце в терминах обобщенного решения волнового уравнения с конечной энергией // Дифференц. уравнения. 2000. Т. 36, № 12.
8. Лурье С.А., Белов П.А. Математические модели механики сплошной среды и физических полей // М.: ВЦ РАН, 2000. 150 с.
9. Борисов С.Н., Ляшенко О.Н. Алгоритм оформления шкал и бинарных полей номограмм // Номографический сборник. 2000. № 17. С. 103–117.
10. Борисов С.Н., Гусев С.И., Лаптева Д.Г., Хованский Г.С. Атлас номограмм. М.: ВЦ РАН, 2000. 76 с.
11. Борисов С.Н., Гусев С.И., Лаптева Д.Г., Памяти Г.С. Хованского // Номографический сборник. 2000. № 17.
12. Гусев С.Н., Евтушенко Ю.Г., Михайлов Г.М., Муромский А.А., Панферова Е.В., Тучкова Н.П. О документах в цифровых библиотеках научных институтов // Научный сервис в сети ИНТЕРНЕТ. Тез. докл. Всеросс. научной конф. (18-23 сентября 2000 г., Новороссийск). М.: Изд-во МГУ, 2000. С. 51–53.
13. Лурье С.А., Белов П.А., Яновский Ю.Г. О моделировании когезионных взаимодействий в сплошных средах // Современные проблемы механики гетерогенных сред. Сб. тр. Института прикладной механики РАН. К десятилетию основания института. М.: Изд-во РАН, 2000.
14. Лурье С.А., Образцов И.Ф., Яновский Ю.Г., Белов П.А. О некоторых классах моделей тонких структур // Изв. Вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки (к 80-летию академика И.И. Воровича). Ростов-на-Дону, 2000. № 3. С. 110–118.
15. Лурье С.А., Белов П.А. и Криволицкая И.И. Об одной модели когезионных взаимодействий в сплошных средах // Конструкции из композиционных материалов. 2000. № 2. М.: ВИМИ. Журнал посвящен 80-летию академика И.Ф. Образцова.
16. Лурье С.А., Белов П.А., Яновский Ю.Г. О моделировании теплопереноса в динамически деформируемых средах // Механика композиционных материалов и конструкций. 2000. Т. 6, № 3. С. 436–444.
17. Lurie S.A. On the Theory of the Thin Films and Cohesion Field // Annual Scientific Conference, Book of Annotations, 2000, 2–7 April, Gottingen, Germany.
18. Лурье С.А., Тучкова Н.П., Шумова Н.П. Об уточненных теориях стержней и пластин из спф и активных композитов на основе СПФ // Сб. научн. тр. IV Межд. семинара “Актуальные проблемы прочности”. Новгород, 2000. С. 81–86.

### 2001

1. Ильин В.А. Граничное управление процессом колебаний струны на двух концах при условии существования конечной энергии // Доклады РАН. 2001. Т. 376, № 3.
2. Ильин В.А. Граничное управление сферически симметричными колебаниями трехмерного шара // Труды МИРАН. 2001. Т. 232.
3. Ильин В.А. Граничное управление процессом колебания струны на одном конце при закрепленном втором конце и при условии существования конечной энергии // Доклады РАН. 2001. Т. 378, № 6.
4. Моисеев Е.И., Капустин Н.Ю. К проблеме сходимости спектральных разложений для одной классической задачи со спектральным параметром в граничном условии // Дифференц. уравнения. 2001. Т. 37, № 8.
5. Моисеев Е.И. О разрешимости одной нелокальной краевой задачи // Дифференц. уравнения. 2001. Т. 37, № 11.
6. Моисеев Е.И. Задача Трикоми для уравнения Лаврентьева–Бицадзе с запаздывающим аргументом // Дифференц. уравнения. 2001. Т. 37, № 11.
7. Моисеев Е.И. О решении некоторых краевых задач для уравнений смешанного типа спектральным методом. International Petrovskii Centenary Conference // Differential Equation and Related Topics, Moscow, May 22–27. 2001 г.
8. Лурье С.А., Белов П.А. Вариационная модель диссипативных сред // Механика композиционных материалов и конструкций. 2001. Т. 7, № 2. С. 266–276.
9. Brychkov Yu.A. A generalization of the Cooke's duplication formulas for Bessel functions // Fractional Calculus and Applied Analysis, 4 (2001), № 4. P. 543–548.
10. Гусев С.Н., Муромский А.А., Петрова Н.П., Тучкова Н.П. Рекомендации для издания трудов Вычислительного центра им. А.А. Дородницына РАН в печатной и электронной средах. М.: ВЦ РАН, 2001. 52 с.

11. *Евтушенко Ю.Г., Михайлов Г.М., Гусев С.И., Муромский А.А., Панфилова Е.В., Тучкова Н.П.* О подготовке информации о трудах академического института для ИНТЕРНЕТ // Научный сервис в сети ИНТЕРНЕТ. Тез. докл. Всеросс. научн. конф. (24–29 сентября 2001 г., Новороссийск) М.: Изд-во Московского университета, 2001. 243 с.
12. *Гусев С.И., Муромский А.А., Тучкова Н.П.* Указатель научных публикаций — полное описание первоисточников в электронной среде общения // Матер. Всеросс. объединенной конф. (20–23 ноября 2001 г. Санкт-Петербург). СПб., 2001. 306 с.

### 2002

1. *Ильин В.А.* Граничное управление на одном конце процессом колебаний, описываемым уравнением  $k(x)[k(x)U_x(x, t)]_x - U_{tt}(x, t) = 0$  // Труды семинара имени И.Г. Петровского. 2002. Вып. 22. С. 121–141.
2. *Ильин В.А.* О граничном управлении процессом колебаний, описываемым уравнением  $k(x)[k(x)U_x(x, t)]_x - U_{tt}(x, t) = 0$  // Докл. Академии наук. 2002. Т. 386, № 2. С. 156–159.
3. *Ильин В.А., Моисеев Е.И.* О граничном управлении на одном конце процессом, описываемым телеграфным уравнением // Докл. Академии наук. 2002. Т. 387, № 5. С. 600–603.
4. *Ильин В.А., Куркина А.В.* Высшая математика. М.: Проспект, 2002. 592 с.
5. *Моисеев Е.И., Капустин Н.Ю.* Об особенностях корневого пространства одной спектральной задачи со спектральным параметром в граничном условии // Докл. Академии наук. 2002. Т. 385, № 1. С. 20–24.
6. *Моисеев Е.И., Вафодорова Г.О.* Задачи без начальных условий для некоторых дифференциальных уравнений // Дифференц. уравнения. 2002. Т. 38, № 8. С. 1091–1094.
7. *Бабешко В.А., Образцов И.Ф., Лурье С.А., Яновский Ю.Г., Белов П.А.* Масштабные эффекты (multiscale effects) в механике сплошных сред // Механика композиционных материалов и конструкций. 2002. Т. 8, № 1. С. 71–82.
8. *Бодунов А.М., Криволицкая И.И., Белов П.А., Лурье С.А.* Масштабные эффекты в тонких пленках // Механика композитных конструкций. М.: ВИМИ, 2002. № 2. С. 33–40.
9. *Lurie S.* Vector model of the dissipative mediums with phase transformations // Book of Abstracts NATO Workshop New Trends in Phase Transformations and their Applications to Smart Structures. Metz, France. 2002.
10. *Lurie S., Belov P., Volkov-Bogorodskii D.* Multiscale modeling in the mechanics // Book of Abstracts, Darmstadt, Sept., 2002, Germany.
11. *Lurie S., Belov P., Turchkova N., Volkov-Bogorodskii D.* Nanomechanical modeling of the nanostructure and dispersed composites // Book of Abstracts, Darmstadt, 2002. Sept., Germany.
12. *Brychkov Yu.A.* Evaluation of some classes of definite and indefinite integrals // Integral Transforms and Special Functions, 13 (2002), № 2. P. 163–167.
13. *Brychkov Yu.A., Geddes K.O.* On the derivatives of the Bessel and Struve functions with respect to the order // International Congress of Mathematicians, Beijing, 2002.
14. *Brychkov Yu.A., Geddes K.O.* On the derivatives of hypergeometric functions with respect to parameters // International Conference on Complex Analysis and Applications, Hanoi, 2002.
15. *Моисеев Е.И., Михайлов Г.М., Гусев С.И., Муромский А.А., Панфилова Е.В., Тучкова Н.П.* Указатель и ИНТЕРНЕТ // Тез. докл. Всеросс. научной конф. (23–28 сентября 2002 г., Новороссийск) М.: Из-во Московского университета, 2002. С. 67–68.
16. **УКАЗАТЕЛЬ-2000.** Составители: Гусев С.И., Муромский А.А., Панфилова Е.И., Тучкова Н.П. Гл. ред. член-корр. РАН Ю.Г. Евтушенко. М.: ВЦ РАН, 2002. 150 с.

### 2003

1. *Моисеев Е.И., Капустин Н.Ю.* Об оценке решения одной задачи для параболо-гиперболического уравнения с помощью рядов Фурье // Дифференц. уравнения. 2003. Т. 39, № 5 (7).
2. *Ильин В.А., Моисеев Е.И.* Граничное управление на одном конце процессом, описываемым телеграфным уравнением // Тр. 2 межд. конф. “Функциональные пространства. Дифференциальные операторы. Проблемы математического образования”, посв. 80-летию со дня рождения чл.-корр. РАН Л.Д. Кудрявцева. М.: Физматлит, 2003.
3. *Прудников А.П., Брычков Ю.А., Маричев О.И.* Интегралы и ряды. Ч. I // М.: Физматгиз, 2003. 632 с.
4. *Прудников А.П., Брычков Ю.А., Маричев О.И.* Интегралы и ряды. Ч. II // М.: Физматгиз, 2003. 664 с.

5. Прудников А.П., Брычков Ю.А., Маричев О.И. Интегралы и ряды. Ч. III // М.: Физматгиз, 2003. 800 с.
6. Прудников А.П., Брычков Ю.А., Маричев О.И. Таблицы неопределенных интегралов // М.: Физматгиз, 2003. 200 с.
7. УКАЗАТЕЛЬ-2001. Составители: С.И. Гусев, А.А. Муромский, Е.И. Панфилова, Н.П. Тучкова, Н.П. Петрова. Гл. ред. член-корр. РАН Ю.Г. Евтушенко. М.: ВЦ РАН, 2003. 193 с.
8. Моисеев Е.И., Михайлов Г.М., Гусев С.И., Муромский А.А., Тучкова Н.П., Вежневцев А.А. О компонентах представления научных результатов академического коллектива в ИНТЕРНЕТ // Тез. докл. Всеросс. научн. конф. (22–27 сентября 2003 г., Новороссийск). М.: Из-во Московского университета, 2003. С. 67–69.

## 2004

1. Ильин В. А., Моисеев Е. И. Граничное управление на двух концах процессом, описываемым телеграфным уравнением // Докл. Академии наук. 2004. Т. 394, № 2. С. 154–158.
2. Ильин В.А., Моисеев Е.И. Оптимальные граничные управления как функции, доставляющие минимум интегралу граничной энергии // Программные системы: теория и приложения. Т. 2. М.: Физматлит, 2004. С. 321–330.
3. Ильин В.А., Моисеев Е.И. Оптимальное граничное управление процессом колебаний струны на одном конце при свободном другом конце // Нелинейная динамика и управление. Вып. 4. М.: Физматлит, 2004. С. 25–38. (МИАН — 100-летию С.М. Никольского).
4. Ильин В.А., Моисеев Е.И. Оптимальное граничное управление смещением на одном конце при закреплённом втором конце и отвечающее ему распределение полной энергии струны // Докл. Академии наук. 2004. Т. 399, № 6. С. 321–330.
5. Ильин В.А., Куркина А.В. Высшая математика. М.: Проспект и Изд-во МГУ, 2004.
6. Ильин В.А., Садовничий В.А., Сендов Бл.Х. Математический анализ. Ч. 1. М.: Проспект, Изд-во МГУ, 2004.
7. Ильин В.А., Садовничий В.А., Сендов Бл.Х. Математический анализ. Ч. 2. М.: Проспект, Изд-во МГУ, 2004.
8. Ильин В.А., Позняк Э.Г. Аналитическая геометрия. М.: Физматлит, 2004.
9. Ильин В.А., Позняк Э.Г. Линейная алгебра. М.: Физматлит, 2004.
10. Ильин В.А., Позняк Э.Г. Основы математического анализа. Ч. 1. М.: Физматлит, 2004.
11. Ильин В.А., Позняк Э.Г. Основы математического анализа. Ч. 2. М.: Физматлит, 2004.
12. Tichkova N., Leontiev A., Lurie S. One algorithm of the solution of the fracture mechanics problems for the finite elastic bodies // Mechanics of composite materials and structures. 2004. V. 10. № 3. P. 25–36.
13. Муромский А.А., Тучкова Н.П. О некоторых особенностях тезауруса для предметной области “Обыкновенные дифференциальные уравнения” М.: ВЦ РАН, 2004 56 с.
14. УКАЗАТЕЛЬ-2002. Составители: С.И. Гусев, А.А. Муромский, Е.И. Панфилова, Н.П. Тучкова, Н.П. Петрова. Гл. ред. член-корр. РАН Ю.Г. Евтушенко. М.: ВЦ РАН, 2004. 193 с.
15. Хованский Г.С. (1921–1999). Пятьдесят лет в номографии. М.: ВЦ РАН, 2004. 132 с.
16. Моисеев Е.И., Прудников А.П., Седлецкий А.М. Базисность и полнота некоторых систем элементарных функций. М.: ВЦ РАН, 2004. 146 с.

**Библиотека ВЦ РАН**, основанная в 1996 г., является одним из подразделений БЕН РАН.

Основу фонда составляет литература, полученная библиотекой в результате раздела библиотеки МИАН, в соответствии с профилем научных разработок ВЦ РАН.

Комплектование библиотеки осуществляется через БЕН РАН, закупок ВЦ РАН, а также даров организаций и частных лиц. Библиотека проводит обслуживание читателей в 3 направлениях: 1 – абонемент; 2 — читальный зал; 3 — межбиблиотечный абонемент.

Библиотека имеет в настоящее время следующие каталоги: отечественных книг, иностранных книг, отечественной периодики, иностранной периодики, каталоги таблиц, диссертаций, включая диссертации, защищенные в ВЦ РАН с момента его организации.

Систематический каталог включает всю периодику, полученную из БЕН с 1996 г. по системе УДК. В библиотеке имеется также картотека статей из отечественных журналов по тематике ВЦ РАН, которая постоянно пополняется (около 2 тыс. карточек в год).

На основе картотеки статей библиотека ведет персональную картотеку на сотрудников ВЦ РАН (персональные “гнезда”). Персональные “гнезда” включают в себя краткие сведения

об авторе, полный список его работ в картотечном варианте с последующим включением в электронный каталог.

Работа была начата в 1996 г., в настоящий момент есть картотека на академиков, членов-корреспондентов, ведущих сотрудников-юбиляров. Библиотека имеет библиографический отдел, который занимается помимо картотеки составлением ежемесячного каталога новых поступлений ВЦ РАН.

Штат библиотеки ВЦ состоит из 5 человек. Зав. библиотекой, главный технолог Е.В. Панфилова.

В рамках отдела научной информации работает **подразделение оперативной полиграфии**, силами которого осуществляется издание научных публикаций ВЦ РАН.

В **издательстве** Вычислительного центра с 1960 г. по 2004 г. вышло помимо большого количества бланочной продукции 2232 научных публикаций. Примерно четверть из них составляют монографии, сборники научных работ, материалы научных конференций. Представляют большой интерес серийные сборники: “Вопросы теории безопасности и устойчивости систем”, “Моделирование, декомпозиция и оптимизация сложных динамических процессов”, “Исследование операций (модели, системы, решения)”, “Задачи исследования устойчивости и стабилизации движения”, “Вопросы моделирования и анализа в задачах принятия решений” и др.

Тридцать пять лет трудилась на посту редактора А.В. Лызлова (1938–2001). Она щедро делилась своим опытом с молодыми начинающими редакторами, предъявляла высокие требования к научным работам авторов. Надо отметить, что еще в 80-е гг. штат редакции насчитывал до 10 человек, среди них были С. Химачёва, А. Лебедева, Л. Монахова, О. Иванова. и др. Увы, общее положение дел в науке отразилось и на состоянии редакционного отдела. Сегодня здесь всего один редактор. Это Н.П. Петрова, выпускница филологического факультета МГУ, канд. филологических наук. Почти два десятка лет она работает в тесном контакте с сотрудниками отдела Е.А. Королевой, Н.А. Сорокиной, С.В. Владимировой, осуществляющими допечатную подготовку изданий ВЦ РАН и поддержку электронной базы данных.

Типография Вычислительного центра работает практически со дня основания института. Закупленное оборудование позволяло выпускать книги в твердом переплете и большими



На снимке сотрудники подразделения оперативной полиграфии: Л.А. Сунгурова, З.Т. Крылова, Н.А. Скирдин, К.С. Родионов, В.А. Чемоданов, А.Д. Тен, Ю.С. Чарин

тиражами, которые шли на продажу через систему “Международная книга”. В 1990 г. парк типографского оборудования морально и физически устарел. Институт приобрел новое импортное типографское оборудование и цветоделительный комплекс. Долгие годы подразделение оперативной полиграфии возглавлял К.С. Родионов. В настоящее время в полиграфии работает 6 человек во главе с Ю.С. Чариним.

Необходимо отметить, что Вычислительный центр является одним из немногих институтов РАН, имеющих свою типографию и полностью удовлетворяющих своих научных сотрудников в издании научных публикаций. Развитие и поддержание типографии на современном уровне — заслуга всего издательского коллектива Вычислительного центра, работающего под непосредственным руководством зав. отделом С.И. Гусева.

## ОТДЕЛ МЕТОДОВ НЕЛИНЕЙНОГО АНАЛИЗА

*А.З. Ишмухаметов*

---

Отдел методов нелинейного анализа образован в 1997 г. на базе двух отделов Института проблем кибернетики РАН, возглавляемых д.ф.-м.н, профессором В.Г. Кармановым и д.ф.-м.н., профессором Е.А. Гребениковым. До 2000 г. новый отдел возглавлял Е. А. Гребеников, с 2000 г. по 2003 г. — д.ф.-м.н. В.А. Березнев. С ноября 2003 г. отделом руководит д.ф.-м.н., профессор А.З. Ишмухаметов.

В состав отдела входят два сектора: методов математического моделирования и вычислительной математики. Соответственно основными задачами отдела являются:

1. Разработка математических моделей, качественной теории для нелинейных задач гамильтоновой космодинамики, исследование устойчивости их решений, а также разработка численных методов для решения указанных классов задач. Эти исследования основаны на использовании методов компьютерной алгебры, методов символьных вычислений и новых компьютерных технологий.

2. Развитие теории и численных методов для решения задач вычислительной математики, задач математического программирования, оптимального управления системами с сосредоточенными и распределенными параметрами, а также разработка математических моделей и методов для решения задач распознавания образов.

В отделе постоянно действует семинар по методам нелинейного анализа, теории оптимизации и выпускается сборник научных трудов.

За период с 1997 г. сотрудниками отдела опубликованы монографии [1–7], научные статьи в различных российских и зарубежных журналах, среди которых отметим работы [8–26]. Сотрудники также регулярно принимают участие, представляют доклады и сообщения на научных симпозиумах и конференциях. За этот период по физико-математическим наукам в отделе защищены:

докторская диссертация — А.Ф. Измаилов: “Устойчивые методы отыскания особых решений нелинейных задач”, 1998 г.

и кандидатские диссертации —

О.А. Брежнева: “Построение методов решения вырожденных задач на основе фактор-анализа нелинейных отображений”, 2001 г.;

Н.И. Земцова: “Исследование устойчивости стационарных решений дифференциальных уравнений ограниченных ньютоновых задач с неполной симметрией”, 2003 г.;

Д.Ю. Карамзин: “Необходимые условия оптимальности в различных классах экстремальных задач управления”, 2003 г.;

В.В. Лукин: “Системный анализ и методы создания слабо тиражируемых программных систем”, 2004 г.

Сотрудниками отдела ведется педагогическая работа в различных высших учебных заведениях и изданы учебные пособия [27–30].

В качестве основных результатов отметим следующие.

1) Е.А. Гребеников и его ученики на основе методов Крылова–Боголюбова внесли существенный вклад в разработку и развитие асимптотической теории многочастотных систем обыкновенных дифференциальных уравнений с малым параметром. Ими разработана аналитическая теория возмущений до любого конечного порядка относительно малого параметра для многочастотных систем обыкновенных дифференциальных уравнений с медленными и быстрыми фазовыми переменными. Существенно, что разработанные методы в отличие от классических методов Крылова–Боголюбова ориентированы на их применение к резонансным системам, связанным с “проблемой малых знаменателей”. Кроме того, разработаны конструктивные методы пошаговой коррекции начальных условий в сочетании с принципом гибкого усред-

нения, позволяющие эффективно строить в аналитической форме асимптотические решения резонансных систем дифференциальных уравнений. Принципиальная новизна разработанного алгоритма заключается в следующем: системы сравнения различного приближения строятся при уточненных начальных условиях на каждом приближении, а не при постоянных начальных условиях для исходной системы, как это принято в известном методе Крылова–Боголюбова. Предложенный алгоритм позволяет получить наибольшую близость решений системы сравнения и исходной системы на больших, асимптотических интервалах времени. Такой подход существенно продвинул конструктивную теорию решения нелинейных систем, заданных на многомерных торах, и позволил реализовать достаточно эффективные алгоритмы для решения ряда резонансных задач нелинейной механики, таких как ограниченная задача трех тел с частотными резонансами различных типов, движение геостационарного спутника, некоторые задачи оптимального управления, механики сплошной среды, задачи физики высоких энергий (динамика заряженных пучков в ускорителях). Эти математические результаты использовались (и продолжают использоваться) Е.А. Гребениковым и его учениками при построении асимптотических решений ограниченной проблемы трех тел и для описания условно-периодических движений различных резонансных небесных тел на асимптотически больших интервалах времени. Эти результаты составляют, в частности, содержание монографий [2, 7].

В настоящее время научные интересы Е.А. Гребеникова и его учеников связаны с развитием конструктивной теории решений гамильтоновых систем на основе широкого применения систем символьных вычислений (ССВ) на ЭВМ. Ими разработаны обобщенные понятия центральных конфигураций и гомографических решений дифференциальных уравнений задачи многих тел, принадлежащих Лагранжу и А. Винтерну, получены необходимые и достаточные условия их существования и выведены основные системы функциональных уравнений, определяющих центральные конфигурации и гомографические решения для ограниченных задач четырех, пяти, шести и семи тел. Сформулированы необходимые и достаточные условия существования стационарных решений уравнений для ограниченных задач  $n$ -тел. Коллективом, возглавляемым Е.А. Гребениковым, выполнен цикл работ по исследованию устойчивости стационарных решений указанных выше ограниченных задач: разработаны аналитические, компьютерные методы линеаризации гамильтоновых систем и исследована устойчивость стационарных решений ограниченных задач многих тел в первом приближении, построены нормализующие преобразования Биркгофа–Пуанкаре, необходимые для применения известной теоремы КАМ-теории (теорема Арнольда–Мозера) в исследовании устойчивости по Ляпунову стационарных решений этих задач. Получены критерии устойчивости по Ляпунову с использованием ССВ “Mathematica”. Эти результаты отражены, в частности, в [6, 8–11].

2) В работах профессора В.Г. Карманова и его учеников исследуется широкий круг вопросов, связанных с математическим программированием, теоретическими основами возникающих при этом задач линейного, выпуклого программирования и построением численных методов их решения. Особое внимание уделяется задачам вырожденного типа.

Основные направления исследований этой научной группы относятся к теоретическому обоснованию и разработке методов численной оптимизации и нелинейного анализа. Авторами получены новые результаты о строении нелинейного отображения и множества решений параметрического нелинейного уравнения в окрестности особой точки. На основе этой теории разработан новый подход к устойчивому численному поиску особых решений для важнейших классов нелинейных операторных уравнений (краевых задач, интегральных уравнений, параметрических нелинейных уравнений). В последние годы большое внимание уделяется вопросам теории чувствительности для задач оптимизации, т. е. качественной и количественной характеристики поведения решений таких задач при параметрических возмущениях. Разработаны новые эффективные численные методы для решения задач оптимизации и вариационного анализа, в том числе при ослабленных требованиях регулярности [12–20].

В работах В.А. Березнева в последние годы большое внимание уделяется построению алгоритмов решения задач линейного программирования полиномиальной вычислительной сложности. В частности, им предложена новая модификация широко используемого симплекс-метода [21], основанная на стратегии последовательного включения ограничений. В настоящее



время предпринимаются усилия к построению схем полиномиальной вычислительной сложности для решения некоторых классов линейных задач дискретной оптимизации.

Другое направление исследований, выполняемых под руководством д.ф.-м.н. В.А. Березнева, связано с построением моделей и разработкой компьютерных систем распознавания рукописной графической информации. По результатам исследований создана система безопасности, основанная на идентификации личности по подписи субъекта и рукописному паролю, пилотная версия которой получила положительные отзывы на ряде зарубежных выставок (ЮАР, Израиль, Германия), а также семинаров и конференций, проводимых в России. В настоящее время ведутся работы по расширению издательских компьютерных систем на основе распознавания рукописных математических формул с использованием стратегии разделения окрестностей эталонных образцов классифицируемых объектов, предложенной в ранних работах В.А. Березнева.

Научные исследования в группе, возглавляемой профессором А.З. Ишмухаметовым, связаны с разработкой численных методов решения задач оптимизации, а также задач оптимального управления с сосредоточенными и распределенными параметрами. В частности, получено систематическое описание классов задач оптимального управления и условий на возмущения, при которых решения возмущенных и невозмущенных задач близки. Для задач минимизации в абстрактном виде рассмотрены общие условия устойчивости и аппроксимаций. Эти результаты применены для систем с сосредоточенными и распределенными параметрами, параболических и гиперболических систем с регулярными и сингулярными возмущениями, а также при аппроксимациях, получаемых с помощью усечения бесконечных рядов и конечноразностных [22–26].

#### Монографии:

1. *Измаилов А.Ф., Третьяков А.А.* 2-регулярные решения нелинейных задач. М: Физматлит, 1999. 336 с.
2. *Гребеников Е.А., Митропольский Ю.А., Рябов Ю.А.* Введение в резонансную аналитическую динамику. М: Янус-К, 1999. 301 с.
3. *Брежнева О.А., Третьяков А.А.* Новые методы решения вырожденных задач. М: ВЦ РАН, 2000.
4. *Ишмухаметов А.З.* Вопросы устойчивости и аппроксимации задач оптимального управления. М: ВЦ РАН, 2000, 151 с.
5. *Ишмухаметов А.З.* Вопросы устойчивости и аппроксимации задач оптимального управления системами с распределенными параметрами. М: ВЦ РАН, 2001, 120 с.
6. *Гребеников Е.А., Козак-Сковородкина Д., Якубяк М.* Методы компьютерной алгебры в проблеме многих тел. М: Изд-во РУДН, издания 1 и 2, 2001, 2002.
7. *Grebenikov E.A., Mitropolsky Yu.A., Ryabov Yu.A.* Asymptotic Methods in Resonance Analytical Dynamics. Ed. CHAPMAN, HALL/CRC (Boca Raton, London, New York, Washington, D.C.), 2004, 255 p.

#### Научные статьи:

8. *Grebenikov E.A.* New constructive methods for analysis of resonant system // Кишинев: Известия АН Республики Молдова. 2003. 1(41). С. 69–77.
9. *Grebenikov E.A., Козак-Сковородкина Д., Якубяк М.* Теорема Арнольда-Мозера и проблема устойчивости в новых моделях космической динамики // ЖВМ и МФ. 2003. Т. 43, № 2. С. 203–211.
10. *Grebenikov E.A., Ikhsanov E.V., Zemtsova N.I.* Theorems on the Stability of Stationary Solutions in the Restricted Ten-Body Problem for Resonance Cases // Computer Algebra in Scientific Computing (CASC 2004), Proceedings of the 7th International Workshop on Computer Algebra in Scientific Computing, St. Petersburg, 2004. P. 223–231.
11. *Zemtsova N.I.* Stability of the stationary solutions of the differential equations of restricted Newtonian problem with incomplete symmetry // Kiev: Nonlinear Dynamics and Systems Theory. 2003. V3(1). P. 105–116.
12. *Измаилов А.Ф., Третьяков А.А.* Применение методов негладкой оптимизации для решения нелинейных операторных уравнений // ЖВМ и МФ. 1998. Т. 38, № 9.
13. *Измаилов А.Ф., Карманов В.Г., Третьяков А.А.* Стабилизирующие свойства градиентного метода для неустойчивых разностных схем // ДАН. 1999. Т. 369, № 5.
14. *A. F. Izmailov, V. G. Karmanov, A. A. Tret'yakov.* Regularization of Linear Approximate Schemes by the Gradient Descent // SIAM Journal on Numerical Analysis. 2001.
15. *Березнев В.А., Карманов В.Г., Третьяков А.А.* О сходимости метода штрафных функций в случае неограниченного множества решений // ЖВМ и МФ. 2002. Т. 42, № 5.
16. *Брежнева О.А., Измаилов А.Ф.* О построении определяющих систем для отыскания особых решений нелинейных уравнений // ЖВМ и МФ. 2002. Т. 42, № 1. С. 10–22.

17. Арутюнов А.В., Измаилов А.Ф. Теория чувствительности для аномальных задач оптимизации с ограничениями типа равенств // ЖВМ и МФ. 2003. Т. 43, № 2. С. 186–202.
18. Arutyunov A.V., Izmailov A.F. Positive definiteness of forms: numerical identification // SIAM J. Control Optim. 2003. V. 41, № 5. P. 1567–1585.
19. Дарьина А.Н., Измаилов А.Ф., Солодов М.В. Смешанные комлементарные задачи: регулярность, оценки расстояния до решения и ньютоновские методы // ЖВМ и МФ. 2004 Т. 44, № 1. С. 51–69.
20. Измаилов А.Ф. Задачи оптимизации с комлементарными ограничениями: регулярность, условия оптимальности и чувствительность // ЖВМ и МФ. 2004. Т. 44, № 7. С. 1209–1228.
21. Березнев В.А. О полиномиальной сложности одной модификации симплекс-метода // ЖВМ и МФ. 2004. Т. 44, № 7. С. 1244–1260.
22. Ишмухаметов А.З. Условия и оценки сходимости решений задач управления гиперболическими системами с сингулярными возмущениями. // Ж. Дифференц. уравнения. 2000. Т. 36, № 6. С. 774–783.
23. Ишмухаметов А.З. Двойственный регуляризованный метод решения одного класса выпуклых задач минимизации // ЖВМ и МФ. 2000. Т. 40, № 7. С. 1045–1060.
24. Ишмухаметов А.З. Регуляризованные методы оптимизации с конечношаговыми внутренними алгоритмами // Докл. РАН. 2003. С. 304–308.
25. Карамзин Д.Ю. К теории принципа максимума в задачах с фазовыми ограничениями // Вестник МГУ. Сер. 15. ВМ и К. 2002. № 4. С. 23–31.
26. Чушкин В.А., Разгулин А.В. О задаче оптимальной Фурье-фильтрации в нелинейных оптических системах с обратной связью // ЖВМ и МФ. 2004. Т. 44, № 9. С. 1608–1618.

**Учебные пособия:**

27. Карманов В.Г. Математическое программирование. М.: Физматлит, 2000. 263 с.
28. Ишмухаметов А.З. Методы решения задач оптимизации. М.: Изд-во МЭИ, 1998. 80 с.
29. Ишмухаметов А.З., Ахметшин А.А., Тюмнев Н.М. Обыкновенные дифференциальные уравнения. Уч. пособие. М.: Изд-во МАМИ, 2002. 144 с.
30. Измаилов А.Ф., Солодов В.М. Численные методы оптимизации. М: Физматлит, 2003. 304 с.

## 20 ЛЕТ ОТДЕЛУ НАДЕЖНОСТИ, УСТОЙЧИВОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ СИСТЕМ. ИСТОРИЯ СОЗДАНИЯ

*Н.А. Северцев*

---

Отдел как структурное научное подразделение был создан в 1984 г. по инициативе директора Института проблем кибернетики академика АН СССР Мельникова Владимира Андреевича, Ученого совета Института и решению отделения информатики, вычислительной техники и автоматизации АН СССР. В это время в СССР (в России) создавалась суперЭВМ векторно-конвейерного типа “Электроника СС БИС”.

### Научное направление отдела

Фундаментальные и прикладные исследования надежности, устойчивости и безопасности сложных систем были направлены на решение следующих практических задач и научных проблем.

**Проектная надежность и эффективность.** Определение при проектировании основных параметров суперЭВМ “Электроника СС БИС” (система “Антей”), обеспечивающих ее максимальную надежность и эффективность при решении больших вычислительных задач в таких предметных областях как гидроаэромеханика, расчет траекторий (движений) ракетной техники, спутниковых систем и космических станций, расчет оптимальных стратегий при проведении операций ВМФ и СА, моделирование динамики функционирования и прогнозирования поведения сложных, многопараметрических систем (задачи метеорологии, сейсмологии и т. п.).

**Системный анализ.** Определение возможностей развития системы “Антей” для решения различного класса вычислительных задач и оптимальной реализации различных алгоритмов (вопросы работы в реальном режиме времени, использование параллельных алгоритмов и т. п.).

**Системная безопасность, устойчивость и надежность.** Разработка принципов принятия оптимальных решений по реализации крупных проектов и программ, принимаемых АН СССР, МО, ОПК и другими министерствами и ведомствами страны с учетом их эффективности, наличия возможных рисков и опасностей.

Благодаря разработанным в отделе методам решения краевых задач, удовлетворяющих краевым условиям неустойчивающего типа и их реализации при изучении динамики процессов распределенного теплообмена в одноканальных и сдвоенных теплообменниках, имеющих распределенную тепловую нагрузку, в конструкцию системы охлаждения ЭВМ “Электроника СС БИС” были внесены требуемые изменения.

Вторым не менее важным результатом, полученным за первые годы работы отдела и направленным на повышение надежности работы ЭВМ “Электроника СС БИС”, являлась методика применения корректирующих кодов для повышения надежности памяти ЭВМ, реализация которой также позволила повысить среднее время безотказной работы ЭВМ.

В то же время в отделе были проведены работы по закрытой тематике. С 1984 года отдел участвовал в выполнении совместных работ с КБ “Южное”. Отдел в рамках этих работ проводил исследования по обеспечению надежности и эффективности боевого железнодорожного ракетного комплекса (БЖРК) с межконтинентальной баллистической ракетой РТ-23 УТТХ (15Ж61) код НАТО SS-24 SCALPEL (генеральный конструктор академик В.Ф. Уткин). За успешное выполнение этих исследований и реализацию результатов ИПК РАН было выделено ряд правительственных наград: орден “Трудового Красного Знамени”, орден “Дружбы Народов”, орден “Знак Почета”, медаль “За трудовую доблесть”. Однако в связи с распадом СССР эти награды сотрудники отдела не получили.

В то же время в издательстве “Наука” сотрудниками отдела был издан ряд монографий: “Статистическая теория подобию. Надежность систем”, “Эффективность сложных систем. Ди-

намические модели”; в издательстве “Высшая Школа” — монография “Надежность сложных систем в эксплуатации и обработке”. Опубликовано 86 научных статей и 2 научных сборника, изданных Научным советом “По комплексной проблеме Кибернетика” при президиуме АН СССР.

### Этапы развития

#### **1 этап: 1984–1993 гг. Проектная надежность и эффективность. Системный анализ.**

Для суперЭВМ были созданы алгоритмы решений больших вычислительных задач, имеющих важное прикладное значение и до сих пор остающихся актуальными:

- решение задач распознавания гидроакустических сигналов с целью опознания и определения местоположения подводных лодок и осуществления “закрытой” подводной связи;
- решение задач расчета оптимальных траекторий для космических аппаратов типа ИС, УС, “Салют”, “Алмаз” в целях поддержания оптимальной конфигурации космической группировки в условиях мирного и военного времени;
- решение задач стабилизации расчетных режимов для сложных управляемых систем.

Для решения ряда стратегических задач, стоящих перед страной, в отделе был разработан ряд сценариев эффективного и надежного использования суперЭВМ “Электроника СС БИС”.

В этот период сотрудники отдела участвовали в подготовке и выпуске десяти томного фундаментального справочника “Надежность и эффективность в технике”, вышедшего в издательстве “Машиностроение”, ими было опубликовано 86 научных статей и три монографии..

На этом этапе в состав отдела входили четыре лаборатории: эффективности, системотехники, надежности, специальных проблем кибернетики

**2 этап: 1993–1997 гг. Системный анализ.** В отделе были разработаны математические методы стабилизации динамических систем с запаздыванием при обработке информации систем наблюдения и контроля.

В этот период были опубликованы следующие научные труды: два научных сборника, изданных Научным советом “По комплексной проблеме Кибернетика” при президиуме АН СССР и 27 научных статей. Методы, разработанные сотрудниками отдела, позволяют:

- 1) синтезировать программу системного анализа сложных систем, обеспечивающую достижение поставленных целей;
- 2) вычислять показатели реализуемости заданного проекта;
- 3) определять пути обеспечения высокой степени реализуемости проектов на основе разработки новых технологий и направлений подготовки специалистов.

**3 этап: с 1997 г. по настоящее время. Системная безопасность, устойчивость и надежность.** Методы системной безопасности, устойчивости и надежности, разрабатываемые сотрудниками отдела, позволяют:

- 1) оценить эффективность осуществления целенаправленной деятельности;
- 2) определить риски возможных опасностей, действующих на человека как представителя определенной группы людей;
- 3) представить в директивные органы полную информацию, необходимую для выбора оптимального решения;
- 4) построить концепцию устойчивого, надежного и безопасного развития сложных систем, включая экологические и социальные.

Методы имеют практическое применение на различных уровнях:

1. Для государства:
  - а) разработка правового поля для реализации концепции национальной безопасности;
  - б) анализ реструктуризации отраслей науки, техники и пр. с позиций национальной безопасности.
2. Для общества:
  - а) устойчивое развитие городов и регионов; б) разработка концепции развития малых городов; в) модели финансирования предприятий в условиях рыночных отношений.
3. Для личности:
  - а) построение спектра возможных опасностей, действующих на человека; б) разработка системы мер, парирующих опасности.

За этот период были опубликованы следующие научные труды: 6 научных сборников по проблемам теории безопасности и устойчивости систем, 20 монографий и более 180 научных статей. Среди этих монографий основными являются следующие:

1. Дедков В.К. Методы прогнозирования индивидуальных показателей надежности. М.: ВЦ РАН, 2003. 188 с.
2. Дедков В.К. Обратная задача надежности. М.: ВЦ РАН, 2004. 244 с.
3. Дивеев А.И., Северцев Н.А. Метод выбора оптимального варианта технической системы. М.: ВЦ РАН, 2003. 106 с.
4. Зубов Н.В., Зубов С.В. Математические методы стабилизации динамических систем. СПб.: Изд-во СПГУ, 1996. 286 с.
5. Зубов Н.В., Зубов С.В. Лекции по теории стабилизации динамических систем. М.–СПб.: АООТ “Мобильность плюс”, 1996. 278 с.
6. Зубов А.В., Зубов Н.В., Мухин А.В. Релейно-импульсные управления и стабилизация динамических систем. СПб.: Изд-во НИИ Химии СПГУ, 2002. 174 с.
7. Зубов Н.В., Северцев Н.А. и др. Конструктивные методы теории устойчивости и их применение к задачам численного анализа. СПб.: Изд-во СПГУ, 2002. 119 с.
8. Ильичев А.В. Устойчивое развитие и безопасность сложных систем. М.: ВЦ РАН. 2001. 190 с.
9. Миронов В.В., Северцев Н.А. Методы анализа устойчивости систем и управляемости движением. М.: Изд-во РУДН, 2002. 180 с.
10. Северцев Н.А., Катулев А.И. Исследование операций. Принципы принятия решений и обеспечения безопасности. М.: Физматлит, 2000. 320 с.
11. Северцев Н.А., Катулев А.И. Математические методы в системах поддержки решений. Тверь: Изд-во Тверского Государственного университета, 2003. 327 с.
12. Северцев Н.А., Шутова Т.В. Моделирование управлением системой военно-экономической торговли России. М.: Изд-во РУДН, 2004. 206 с.

Сотрудники отдела приняли участие в работе более 30 международных и всероссийских научных форумов. В настоящее время в отделе два сектора: сектор специальных проблем кибернетики и сектор моделирования безопасности. Количество научно-инженерных сотрудников в отделе составляет 12 человек, включая 5 докторов наук и 6 кандидатов. Отдел выпускает научный сборник “Вопросы теории безопасности и устойчивости систем”, который внесен в список изданий, рекомендованных ВАК для публикаций основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора наук.

### Фундаментальные и прикладные результаты научных исследований отдела

**1. Методы исследования теплообменных процессов.** Для описания динамики процессов теплообмена в распределенных системах было предложено использовать метод “простых” волн. При этом волна определялась как нестационарное векторное поле или как суперпозиция нескольких нестационарных полей.

При представлении теплообменных процессов в виде суперпозиции простых волн были разработаны методы построения решений краевых задач подобного вида.

Автор – д.ф.-м.н., профессор Н.В. Зубов.

**2. Быстрый метод выбора оптимального варианта изделия на основе бимонотонного разложения функции.** Разработанный метод бимонотонного разложения функций заключается в представлении каждой из функций задачи в виде разности двух монотонно неубывающих функций. Это разложение позволяет на подмножестве значений аргумента построить оценки предельных значений функций, по результатам проверок которых возможно отсеивание всего подмножества.

Разработанная теория бимонотонного разложения функции позволяет конструировать эффективные алгоритмы поиска оптимального варианта.

Автор — д. т. н., профессор А.И. Дивеев.

**3. Матричный метод исследования системной безопасности.** Данный метод заключается в построении генеральной матрицы, отражающей все мероприятия, и исчерпывающей системы мер парирования опасностей до уровня, приемлемого для заданного объекта защиты на всем множестве прогнозируемых опасностей. Матрица безопасности описана на основе теории графов и векторного анализа.

Автор — д.т.н., профессор А.В. Ильичев.

**4. Методы и модели прогнозирования индивидуальных показателей надежности.** На основе марковских моделей изменения вероятностных характеристик разработаны математические модели прогнозирования индивидуальных показателей надежности.

Эта модель легла в основу решения задачи прогнозирования случайных неповторяющихся событий, которые происходят только один раз за все время существования технической системы.

С помощью метода регуляризации впервые решена обратная задача надежности, которая заключается в установлении зависимости между показателями надежности и характеристиками условий использования объекта.

Все методы и модели исследования прогнозирования индивидуальных показателей надежности основаны на математическом аппарате теории стохастической индикации и уравнениях обратной задачи теории надежности, описывающих развитие стохастических объектов в пространстве технических характеристик.

Автор — д.т.н., профессор В.К. Дедков.

**5. Аналитическое решение задачи минимизации общего риска в экспоненциальной модели безопасности объекта.** Разработана экспоненциальная модель безопасности технической системы на заданном отрезке времени. Предложены конкретные модели и расчетные формулы.

Автор — д.т.н., профессор Н.А. Северцев.

**6. Проблема создания надежных контрольно-диагностических систем.** Выполнено исследование возможностей и принципов создания сверхнадежного оборудования для систем контроля и диагностики сложных технических систем (СТС). Исследовались процессы диффузионной деградации полупроводниковых приборов, контролирующего функционирование системы. Разработан метод исследования, основанный на обработке больших объемов разнокачественных данных с применением статистической теории подобия. Проведено обоснование подходов и способов реализации на отечественной элементной базе сверхнадежных электронных устройств.

Автор — к.т.н. С.А. Щербаков.

### Научно-организационная деятельность

Сотрудники отдела активно взаимодействуют с научно-промышленными организациями. С НПО им. Лавочкина проведено моделирование ориентации и стабилизации корпуса космического аппарата в процессе непрерывного разворота панелей солнечных батарей. Разработаны прикладные модели надежности и устойчивости функционирования космического аппарата.

Совместно с Центром системных технологий разработаны методы и модели безопасности и устойчивости развития малых городов на примере города-наукограда Реутов Московской области с использованием аэрокосмических технологий (технологий двойного назначения).

Отделом надежности и устойчивости систем ВЦ РАН совместно с НИИ космического приборостроения проведено исследование проблемы поставки компонентов космического назначения в соответствии со стандартной Западно-Европейской программой космических исследований. Данное исследование проводилось с целью сравнения разработанной нами теории управления качеством и надежностью отечественной космической радиоэлектроники с подходами, разработанными Западно-Европейским космическим агентством.

Отдел плодотворно сотрудничает с НПО машиностроения по тематике “Надежность и эффективность ракетно-космической техники”. Сотрудники отдела в течение трех лет по договору участвовали в исследовании и решении проблем теплофизики применительно к сверхскоростным летательным аппаратам по линии учебно-научного центра “Теплофизика” при МВТУ им. Баумана.

С момента создания отдела его сотрудники участвовали в 74 научных конференциях по фундаментальным и прикладным проблемам науки и техники. При этом 15 конференций было проведено по инициативе отдела. Первая конференция, организованная отделом при участии АН СССР и АН БССР, проводилась в г. Минске в 1987 г. по теме “Создание суперЭВМ”. На этой конференции сотрудниками отдела сделано 12 докладов. За научные достижения, представленные в докладах на Международной конференции “Передовые технологии на пороге XXI в.” (1999 г.), посвященной 145-летию В.Г. Шухова, сотрудники отдела Н.В. Зубов, А.И. Дивеев, А.А. Тарасов награждены Правительством Москвы медалями им.

В.Г. Шухова и почетными грамотами за лучшие доклады. Отдел является участником и соучредителем постоянно действующей Международной научной многоцелевой конференции “Надежность и качество” в г. Пензе, где зав. отделом Н.А. Северцев является вице-президентом конференции и руководителем секции “Моделирование безопасности и устойчивости систем”.

В составе делегации РАН профессор Н.А. Северцев участвовал с докладом на Международном Паугошском конгрессе в г. Лондоне (1995 г). Доклад опубликован в Трудах конгресса. Н.А. Северцев также был участником Международных конференций в Швеции (г. Стокгольм), ЧССР (г. Братислава), СРВ (г. Ханой) по тематике “Системотехника”, “Информационные технологии”, “Теория массового обслуживания”. Отдел отмечен благодарственными письмами Президента Международной конференции “Надежность и качество”.

Персонально отмечены сотрудники отдела Н.А. Северцев, А.И. Дивеев, Н.В. Зубов в благодарственном письме Генерального директора судебного департамента Верховного суда РФ за разработку новых методов формализации правовой науки.

В настоящее время сотрудники отдела плодотворно работают над созданием “Математических основ теории системной безопасности”.

## **ОТДЕЛ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМ ПРОЕКТИРОВАНИЯ**

*Л.Л. Вышинский, Ю.А. Флеров, М.Г. Фуругян*

---

Отдел математического моделирования систем проектирования создан в 1973 г. по инициативе академиков РАН А.А. Дородницына и Н.Н. Моисеева под первоначальным названием “Отдел теории и методов автоматизации проектирования”. Руководил отделом до 1990 г. академик РАН П.С. Краснощеков, в настоящее время — чл.-корр. РАН Ю.А. Флеров.

Научные исследования отдела проводятся по следующим направлениям:

1. Разработка математических методов структурно-параметрического описания объектов проектирования.
2. Разработка системы математического моделирования структурно-параметрического облика сложных объектов и их подсистем.
3. Разработка математических моделей функционирования сложных объектов проектирования и их подсистем.
4. Разработка и исследование иерархических структур принятия проектных решений.
5. Разработка методов последовательного анализа вариантов в задачах проектирования сложных технических объектов.
6. Разработка алгоритмов планирования вычислений в многопроцессорных системах реального времени.
7. Разработка САПР систем реального времени.
8. Комбинаторное представление графов и сетей.
9. Разработка технологии и инструментальных средств проектирования, создания и сопровождения прикладных информационно-вычислительных систем и систем автоматизированного проектирования.
10. Разработка программного обеспечения прикладных информационно-вычислительных систем и систем автоматизированного проектирования.

### **1. Основные научные результаты отдела**

Среди основных научно-технических результатов деятельности отдела можно выделить следующие.

Разработаны начала математической теории проектирования сложных технических систем (СТС) и объектов [1–8].

Исследована и частично решена фундаментальная научная проблема создания и совершенствования теории и методологии решения основной концептуальной задачи параметрического проектирования сложных технических систем – задачи параметрического синтеза облика системы данного целевого назначения. Развита методика, позволяющая формализовать этап синтеза и тем самым заложить основы математической теории проектирования сложных систем [7].

Одной из центральных проблем этапа синтеза является проблема корректной декомпозиции и структуризации процесса проектирования. Получены условия согласованности критериев на различных уровнях иерархии, достаточные для нахождения множества эффективных вариантов в многоуровневых системах автоматизированного проектирования сложных технических объектов [7, 8].

Для многокритериальных моделей синтеза предложены общие конструкции аппроксимирующих отношений, которые могут использоваться для предварительного отсева неперспективных вариантов. Поставлены и решены минимаксные задачи синтеза системы по вспомогательным аппроксимирующим отношениям. Уточнены и детализированы полученные условия согласованности критериев на различных уровнях иерархии, достаточные для нахождения множества эффективных вариантов в многоуровневых системах автоматизированного проектирования сложных



технических объектов. Для многокритериальных моделей синтеза изучены общие конструкции аппроксимирующих отношений, которые могут использоваться для предварительного отсева неперспективных вариантов [7, 8].

Изучена корректность декомпозиции в пространстве оценок и в пространстве формальных описаний альтернативных вариантов проектируемой системы [7, 8].

Формализация иерархии описаний СТС и ее моделей функционирования дает основу для решения фундаментальной задачи автоматизации проектирования – задачи синтеза сложной технической системы, удовлетворяющей заданным функциональным характеристикам, и построения иерархической структуры задач проектирования СТС. Изучена проблема проектирования иерархических схем процесса проектирования и управления ими в интерактивном режиме. Изучена проблема согласования критериев оценки эффективности функционирования СТС в иерархической структуре задач проектирования [8, 9].

Исследован один из подходов к проблеме согласованности в иерархических системах автоматизированного проектирования. На содержательном уровне согласованность отношений предпочтения на  $k$ -м и  $(k + 1)$ -м уровнях иерархии означает, что при переходе от агрегированного на более детальный уровень описания системы сохраняется частичная упорядоченность альтернатив по отношению предпочтения на более детальном уровне. Получены достаточные условия согласованности и разработана иерархическая многокритериальная процедура улучшения опорного решения, полученного на агрегированном уровне описания, при наличии условий согласованности [7–9].

Приведенный цикл результатов и его практическая реализация получили широкую известность. Группа сотрудников отдела была отмечена в 1981 г. премией Совета Министров СССР в области науки и техники за разработку и внедрение первой очереди системы автоматизации проектирования сложных технических объектов.

Получен результат, связанный с теоремой Моцкина об альтернативе, но не опирающийся на нее: система строгих однородных линейных неравенств совместна в том и только том случае, если начало координат не принадлежит выпуклой оболочке ненулевых вектор-строк матрицы, определяющей систему неравенств, причем проекция начала координат на выпуклую оболочку является решением системы [10].

Получены необходимые и достаточные условия существования решения, слабо эффективного по векторному критерию, при условиях регулярности, не предполагающих выпуклости множества допустимых решений. Для любого доминируемого решения получен конечный набор направлений приближения к множеству слабо эффективных решений [11]. Предложен сходящийся метод построения множества эффективных векторов, устойчивый к вычислительным погрешностям [12, 13].

Разработана интеллектуальная инструментальная среда для автоматизации конструкторских и инженерных расчетов (ИИС ФАКИР). Система ИИС ФАКИР предназначена для организации и сервисного обеспечения решения различных инженерных задач, возникающих в процессе проектирования, а также для технологической поддержки создания и эксплуатации систем автоматизированного проектирования (САПР). Система может быть использована научно-исследовательскими и проектными организациями, разрабатывающими новые образцы техники, а также разрабатывающими или внедряющими САПР для различных предметных областей.

Инструментальные системы САПР необходимы для автоматизации создания расчетных, информационных и управляющих программ как при разработке САПР, так и в процессе их использования. Применение ИС позволяет существенно сократить сроки создания прикладных подсистем САПР, а впоследствии облегчить различные их модификации. Однако ИС необходимы и в процессе автоматизированного проектирования при постановке конкретных задач. Постановка задач проектирования включает построение моделей объектов проектирования, описание критериев и областей поиска при выборе оптимальных вариантов проекта, описание форм представления текстовой и графической информации о результатах решения, а также установление связей с другими задачами.

Таким образом, назначением ИИС ФАКИР является решение следующих основных задач:

— обеспечение пользователя базовыми средствами описания математических моделей объектов проектирования, частных инженерных задач и проектных процедур;

- автоматизация построения математических моделей, алгоритмов решения и рабочих программ для решения инженерных задач;
- обеспечение информационной связи между частными задачами;
- обеспечение параметрических расчетов и выбор оптимальных вариантов при решении инженерных задач;
- обеспечение хранения, поиска и анализа результатов решения инженерных задач;
- обеспечение представления результатов в удобном для пользователя виде, в том числе в виде графиков, номограмм и т. п. [14].

Разработана системы ЭЛМОН для автоматизации проектирования схем соединений радиоэлектронного оборудования объектов машиностроения. Система ЭЛМОН внедрена на ряде предприятий авиационной промышленности [14].

Разработана технология и программное обеспечение автоматизации проектирования комплекса радиоэлектронного оборудования объектов машиностроения — САПР РЭО.

Принципиальная новизна состоит в создании в ЭВМ полной информационной модели комплекса оборудования объекта проектирования, включающей внутреннее представление протоколов согласования, принципиальных схем, схем соединений, монтажных схем, схем разводки щитов и др. технологической информации. Это позволяет говорить о “сквозной” автоматизации проектирования. Кроме того, предполагается максимальная автоматизация некоторых этапов проектирования при возможности вмешательства в любой момент в этот процесс со стороны конструктора. Наличие базы знаний, в которой накапливаются типовые конструкторские решения, позволяет существенно сократить время проектирования. Внедрение комплексной автоматизации проектирования РЭО позволяет поднять производительность труда при разработке РЭО от 2 до 5 раз при многократном повышении качества документации [14].

Создан программный комплекс обработки, хранения и визуализации табличных и функциональных зависимостей — система ТАБУС. В системе ТАБУС реализованы инструментальные средства, математические методы и программное обеспечения обработки, хранения и визуализации табличных и функциональных зависимостей для анализа и синтеза проектов, систем и процедур принятия решений [15].

Создано программное обеспечение автоматизации проектирования вычислительных систем реального времени. Исследована задача составления допустимого расписания в многопроцессорных системах с различными ограничениями на прерывания и связи между процессорами и на число переключений в каждый момент времени. Цикл этих работ подробнее описан в разд. 3.

Охарактеризованы транзитивные графы, допускающие упорядоченное вложение в плоскость, разработан полиномиальный алгоритм распознавания таких графов, и найдена асимптотика их числа [16].

При задании двух весов, принимающих два значения на каждом ребре сети, разработан полиномиальный алгоритм построения остовного дерева, минимального по первому весу при ограничениях по второму весу [16].

Исследованы графы без чередующихся циклов, для которых построено каноническое представление, получены формулы числа неизоморфных графов и долей  $k$ -связных графов ( $k = 0, 1, 2, \dots$ ) [16].

Предложена методика оценки запасов газа и коэффициентов перетоков, основанная на использовании блочной газодинамической модели месторождения и решении системы уравнений материального баланса. Метод обладает большей устойчивостью результатов по сравнению с ранее известными методами.

Разработаны новые численные методы решения обратной задачи, основанные на минимизации отклонений средних давлений в блоках от давлений, вычисленных с помощью модели (прямое сопоставление измеряемых параметров). Разработаны алгоритмы оптимального выбора разбиения месторождения на газогидродинамически связанные блоки. В его основу положен принцип минимизации разницы пластовых давлений по скважинам в пределах каждого блока.

Разработан метод прогнозирования оптимальных величин отбора газа по всем частям месторождения, при которых, во-первых, минимизируются перетоки газа между различными частями месторождения, и, во-вторых, выполняются различные ограничения на уровни добычи газа, определяемые экономическими и технологическими факторами.

Разработан программный комплекс, реализующий указанные методы. Проведены расчеты запасов газа и перетоков в Ямбургском, Шебелинском и Советабдском месторождениях [17–20].

Получена точная формула числа минимальных раскрасок интервального графа, что позволило разработать линейные алгоритмы для некоторого класса задач теории расписаний. Получен линейный алгоритм нахождения минимаксных раскрасок графа и асимптотическая формула числа интервальных графов с двумя параметрами. Доказана теорема о представлении графа отрезками 3-мерного пространства [21].

Разработана технология и проектный подход к автоматизации проектирования, создания и сопровождения “клиент – серверных” прикладных информационно-вычислительных систем и систем автоматизированного проектирования, основанный на формализации описания проекта системы и автоматической генерации программного кода (“Генератор проектов”) [22–25]. Цикл этих работ подробнее описан в разд. 2.

Поставлены и решены новые задачи распределения нескольких видов ресурсов на сетевых графиках. Разработан эффективный алгоритм построения расстояния Минковского между двумя выпуклыми непересекающимися многогранными множествами. Реализованы алгоритмы синтеза многопродуктовых сетей. Построены эффективные алгоритмы решения некоторых задач многократного минимакса [26–31].

С использованием проектного подхода при участии сотрудников отдела был разработан ряд автоматизированных информационных систем для финансовых приложений: автоматизированная банковская система “ГАМБИТ”, система межбанковских платежей, система учета и погашения взаимных задолженностей хозяйствующих субъектов и ряд других систем [22–23].

С использованием “Генератора проектов” разработана система “Электронный каталог деталей объектов машиностроения” для хранения и оперативного доступа к данным, которые описывают каталоги узлов, агрегатов и деталей разнообразных сложных технических объектов машиностроения.

С использованием “Генератора проектов” разработана новая версия автоматизированной системы весовых расчетов (АСВР-М) для обеспечения проектирования летательных аппаратов.

В стадии реализации находится проект создания комплексной системы инженерных расчетов (КПИР) для автоматизации проектирования летательных аппаратов на этапе эскизного проектирования.

Разработан проект многопроцессорного программного комплекса мониторинга, анализа и прогнозирования поведения многоагентных систем на базе нейрокомпьютерной модели мозжечка [32, 33].

Созданы математические модели для синтеза термодинамически эффективных схем реактивных двигателей [34–40]. Решены проблемы формирования критериев оценки и построения простейших моделей функционирования такого сложного технического объекта как воздушно-реактивный двигатель (ВРД). Исследованы проблемы выбора ВРД известных типов и проблема согласования простейших формализованных описаний эффективных вариантов ВРД с более подробными описаниями в системах автоматизированного проектирования.

Рассмотрена обобщенная схема основных типов ВРД. Поставлена и исследована двухкритериальная задача. Критериями оптимальности идеальных вариантов являются удельная тяга и удельный импульс по теплу. Установлены причины несовпадения отдельных результатов с результатами традиционной теории, даны неформальные оценки влияния факторов неидеальности реальных процессов на результаты сравнения.

Рассмотрены турбо-реактивные двигатели (ТРД) с регенерацией тепла и упрощенные варианты схемы известного трехвального двухконтурного ТРД с промежуточной камерой сгорания. Найдены оптимальные варианты идеальных терморективных систем при фиксированных локальных внешних условиях. Показано, что одноконтурные двигатели с дополнительной камерой сгорания между ступенями турбины экономичнее своих прототипов (ТРД, ТРДФ), что регенерация тепла дает положительный эффект не при любых условиях.

В простейших представлениях описывается функционирование ВРД заданной конструкции при нерасчетных внешних условиях, возможности рассматриваемых законов управления сравни-

ваются качественно и в численных примерах. Данные исследования служат примером того, что на нулевом уровне описания могут решаться некоторые вопросы регулирования двигателя.

Построены схемы ВРД, позволяющие политропически охлаждать динамически сжатый в воздухозаборнике воздух, отводить тепло в атмосферу, утилизировать рассеиваемое тепло сильно нагретыми элементами конструкции, а также позволяющие реализовать термодинамический цикл, масса рабочего тела которого больше массы газа, покидающего двигатель.

Исследована проблема построения реактивных двигателей периодического действия. Построены варианты поршневого газогенератора, являющиеся кардинальными модификациями двигателей внутреннего сгорания Отто и Дизеля. Рассмотрена проблема моделирования силовых установок для космических транспортных систем и синтеза их схем.

Исследована проблема построения реактивных двигателей периодического действия.

## **2. Автоматизация проектирования информационно-вычислительных систем**

Одной из основных задач автоматизации проектирования как предметной области является разработка инструментальных программных средств, обеспечивающих повышение эффективности разработки проектов сложных объектов различного целевого назначения. Безусловно, специфика проектируемых объектов определяет перечень конкретных решаемых в САПР задач, а также ее архитектуру, математическое, программное, информационное и техническое обеспечение. Традиционный класс объектов автоматизации проектирования обычно связывают со сложными техническими объектами в машиностроении, электронике, строительстве и т. п. В рамках этого класса объектов достаточно хорошо проработаны теоретические основы САПР, а также существует целая гамма конкретных реализаций систем автоматизированного проектирования. Вычислительный центр РАН принимал активное участие в создании САПР летательных аппаратов [41–56]. С тех пор круг наших интересов в области автоматизации проектирования существенно расширился. Нами был получен ряд теоретических и практических результатов в области автоматизации проектирования информационных систем различного применения, в частности при разработке финансовых приложений [57–74]. Такое изменение предметной области должно было привести к полному изменению средств и методов автоматизации проектирования. Но оказалось, что многие проблемы синтеза сложных систем (а информационно-поисковые и информационно-расчетные финансовые системы очень сложны) инвариантны по отношению к предметной области.

Проектирование и разработка современных информационных систем в области финансовых приложений является очень дорогостоящим делом. Характерным примером сложных финансовых приложений являются автоматизированные банковские системы (АБС). Разработка АБС, их внедрение в работу банков, последующая доработка, доводка, сопровождение могут занимать не один год работы больших коллективов высококлассных специалистов. Закономерности современного этапа развития сферы финансовых услуг характеризуются очень высокими темпами роста объема услуг, расширением спектра финансовых инструментов, усложнением применяемых технологий. Это влечет за собой усложнение разрабатываемых финансовых информационных систем. Современные клиент-серверные системы с сотнями и тысячами удаленных рабочих мест обрабатывают в режиме реального времени миллионы транзакций в сутки. Практически возникла новая отрасль, связанная с разработкой финансовых информационных приложений.

Динамика потребности в области финансовых приложений и жесткая конкуренция в этой сфере диктуют необходимость кардинального сокращения сроков их разработки. Для достижения этой цели разрабатывающие компании вынуждены привлекать большое число программистов. Однако рост числа разработчиков, увы, не приводит к сокращению сроков разработки. И если еще сроки доведения системы до сдачи в эксплуатацию можно как-то регулировать директивным способом, то доводка до рабочего состояния сложных финансовых информационных систем растягивается на неопределенное время и приводит к существенным расходам разрабатывающих компаний.

Эта ситуация очень напоминает период бума научно-технической революции в области создания систем вооружения, когда сложность различных классов технических объектов бурно росла. При этом и сроки проектирования, и особенно сроки натурных испытаний, объем работ, модификаций катастрофически увеличивались, несмотря на большой приток научных

и технических кадров в эти области. Может быть, наша аналогия покажется натянутой, но если сравнить, например, самолет с несколькими десятками тысяч деталей и современную банковскую программную систему с сотнями тысяч операторов, то станет очевидна, по крайней мере, сопоставимость проблемы роста энтропии при проектировании самолетов и при разработке сложных информационных систем. Энтропию проектов сложных разрабатываемых систем можно оценить как

$$H \approx -\sum(p_i \log p_i + (1 - p_i) \log (1 - p_i)),$$

где  $i = 1, \dots, N$ ,  $N$  — это характеристика сложности проекта системы (число деталей в проекте самолета или число операторов в исходном программном коде АБС), а  $p_i$  — вероятность того, что в  $i$ -м элементе проекта (в чертеже детали или в тексте оператора) разработчик допустил ошибку. В применении к проектированию энтропия — это величина противоположная качеству, мера его неадекватности. Действительно, энтропия пропорциональна числу вопросов, которые необходимо “задать” созданной по этому проекту системе, чтобы определить ее состояние, то есть выявить и устранить допущенные в процессе проектирования ошибки. Увеличение энтропии всегда очень дорого стоит. При проектировании самолетов это ведет к увеличению объема летных испытаний. В применении к финансовым информационным системам увеличение энтропии означает увеличение затрат и времени на доведение системы до рабочего состояния, а зачастую и необходимость существенных доработок в процессе их функционирования. Доработки, модификации, обновление версий финансовых систем в процессе эксплуатации является очень неприятным, трудоемким и дорогим последствием увеличения энтропии исходных проектов. Фирмам — разработчикам АБС и других аналогичных систем приходится держать специальные службы сопровождения, трудозатраты которых, как правило, в несколько раз превышают трудозатраты разработчиков проекта.

Из сказанного выше очевидно, что увеличение численности разработчиков проекта без изменения подхода к проектированию не может существенным образом повлиять на сроки и качество создания систем, а зачастую и ухудшает его, поскольку увеличивается вероятность ошибок при усложнении координации разработки проекта. Единственным выходом из этой ситуации является уменьшение сложности проекта и уменьшение вероятности ошибок проектирования. Только таким образом можно существенно уменьшить значение энтропии проекта и, следовательно, не только уменьшить трудоемкость разработки, но и существенно сократить затраты сопровождения системы.

Уменьшение сложности проекта — это не уменьшение сложности разрабатываемой системы. Увы, сложность системы — это неизбежность развития современных финансовых технологий. Уменьшение сложности проекта — это упрощение формального описания создаваемого программного продукта, т.е. уменьшение того самого  $N$  — количества “операторов” исходного текста проекта системы. Мы заключили слово “оператор” в кавычки потому, что уж если говорить о формальном языке описания проекта, то это должен быть не процедурный язык высокого уровня, в котором основными элементами являются не операторы, а описания математических моделей, содержательных понятий и объектов, связанных с предметной областью. Проект — это формальный документ или совокупность формальных документов, которые обладают определенной структурой, определенным составом своих компонент, правилами оформления, синтаксисом, семантикой и прочими атрибутами формального объекта. Существенное требование к языку описания проектов состоит в том, чтобы уровень описания и формализации проекта был бы достаточным для однозначного истолкования его на следующем этапе, на этапе создания программного кода.

Другим резервом уменьшения энтропии проекта является уменьшение вероятности возникновения ошибок. Самым эффективным способом реализации этой задачи в программных системах является автоматизация создания программного кода. Создание программного кода фактически является технологическим этапом реализации проекта, и если проект — это формальное описание разрабатываемой системы, то создание программного кода может быть и должно быть полностью автоматизировано. Автоматизация создания программного кода требует специального инструментария — генератора программного кода, который является технологической компонентой проекта. Жизнь проекта программной системы не заканчивается ее реализацией. Длительность жизненного цикла программных систем определяется способностью к

модификациям. Как уже говорилось выше, модификация работающей системы является весьма дорогим и сложным процессом. Если же при разработке системы используется автоматический генератор программного кода, то процедура модификации существенно упрощается за счет того, что изменения вносятся только в проект, а все дальнейшие изменения в программном коде, информационном окружении и прочих компонентах системы осуществляются автоматически.

Однако универсальных систем генерации программного кода прикладных систем не существует. Если следовать уже проводимым ранее аналогиям с проектированием самолетов, то для их производства специально проектируется и создается оснастка — стапели, шаблоны, сборочный инструмент и прочее. Точно так же для больших информационных систем нужно иметь специальные инструментальные средства автоматизации, которые были бы неотъемлемой технологической компонентой проекта системы. Понятно, что такой проблемно ориентированный инструментарий не может и не должен обладать многими свойствами универсальных CASE-продуктов, но он должен решать те задачи автоматизации, без которых невозможно обойтись при разработке конкретных приложений.

Какими же свойствами должны обладать подобные “встраиваемые” в проект инструментальные средства? Ниже перечислены основные задачи автоматизации, которые приходится решать при проектировании информационных систем:

- создание единого информационного пространства разрабатываемого проекта;
  - описание архитектуры проектируемой системы;
  - структурное проектирование информационных систем;
  - разработка математических моделей объектов предметной области;
  - описание логических структур и моделей хранимых данных;
  - описание серверных компонент системы;
  - описание пользовательского интерфейса, механизмы редактирования пользовательских документов, форм, диалогов и прочее;
  - создание опытных образцов, макетов, демонстрационных стендов;
  - автоматизация программирования, генерация исходного программного кода;
- автоматизация разработки программной и эксплуатационной документации системы;
- автоматизация разработки программы, методики и тестов функциональных, ресурсных и других испытаний системы;
  - автоматизация разработки средств загрузки и инсталляции системы, средств, обеспечивающих системное обслуживание и эксплуатацию.

В Вычислительном центре был разработан ряд программных продуктов с общим названием Генератор проектов, который в той или иной мере решает перечисленные задачи [67–74]. Ниже дано краткое описание технологии их решения с помощью Генератора проектов. При этом мы ориентируемся в основном на свой опыт разработки финансовых и других приложений.

*Единое информационное пространство проекта* необходимо для организации процесса разработки системы информации и обеспечения коллективного доступа к этой информации. В рамках единого информационного пространства хранятся все документы от технического задания на разработку и вплоть до исполняемых модулей и инсталляционных пакетов всех разработанных версий. Средствами инструментария необходимо поддерживать целостность хранимой информации, т.е. осуществлять контроль полноты и непротиворечивости данных, соответствие дат, версий и других атрибутов различных компонент разрабатываемого проекта. Создание единого информационного пространства проекта — это первый формальный шаг, с которого начинается разработка прикладной информационной системы.

*Архитектура проектируемых систем* — это один из главных вопросов, который нужно решить на самых первых шагах проектирования информационных систем. Под архитектурой понимается состав основных компонент информационной системы, и связи между ними. Существенной особенностью информационных систем, которые разрабатываются с помощью Генератора проектов является то, что они являются многопользовательскими клиент-серверными системами, работающими с большими объемами хранимой информации.

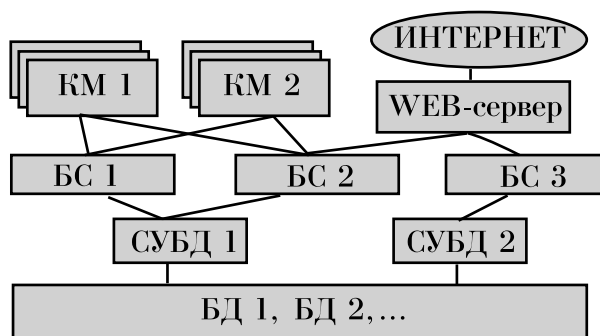


Рис. 1. Клиент-серверная архитектура

Основными информационными и программными компонентами таких систем, представленными на рис. 1, являются:

- БД — централизованные или распределенные базы данных и хранилища информации;
- СУБД — системы управления базами данных, которые организуют физический доступ к данным, организуют и обеспечивают надежное их хранение, поиск, модификацию;
- БС — прикладные бизнес-серверы, программы, которые принимают запросы от пользователей системы на выполнение определенных бизнес-процедур, обрабатывают эти запросы, проводят необходимые вычисления, формируют необходимые логические запросы к базам данных, получают информацию из баз данных, формируют и отправляют ответы пользователям;
- КМ — клиентские модули-программы, которые обеспечивают формирование запросов пользователей на выполнение необходимых бизнес-процедур, передачу этих запросов на БС, прием ответов от БС и представление полученных результатов на терминальных устройствах;
- WEB-серверы — прикладные программы, которые обеспечивают санкционированный доступ к прикладной системе пользователям ИНТЕРНЕТ. WEB-серверы являются специализированными клиентскими модулями системы;
- программные и информационные средства, обеспечивающие связь между отдельными компонентами системы.

*Математическое моделирование* объектов предметной области. Это наиболее сложная и наиболее ответственная задача всего процесса проектирования прикладных систем. Не существует и не может существовать универсальных методов и средств математического моделирования произвольных систем, объектов и процессов. В то же время для конкретных классов задач существуют специализированные средства и языки моделирования предметной области. Именно это обстоятельство и позволяет предполагать, что наиболее эффективными системами автоматизации проектирования могут быть проблемно ориентированные CASE-средства. При разработке финансовых приложений необходимо уметь моделировать такие сущности, как:

- субъекты финансовых отношений и их организационные структуры;
- финансовые и платежные инструменты;
- финансовые операции и технологии их выполнения;
- механизмы и технологии бухгалтерского учета;
- аналитические инструменты финансовой деятельности.

Существует два подхода к реализации математических моделей, т.е. к использованию их в бизнес-процедурах. Первый подход связан с построением на базе этих моделей программ, реализующих конкретные задачи предметной области. Другой подход связан с механизмом интерпретации формального описания математических моделей в конкретных условиях решаемых задач. Выбор способа реализации математических моделей представляет собой один из аспектов разработки архитектуры системы.

*Логические структуры данных* формируются на основе разработанных для проектируемой системы математических моделей. Логические структуры используются при организации передачи и хранения данных. Характер использования хранимой информации определяет *модель хранимых данных*. В прикладных системах используются реляционные, иерархические и сетевые модели данных. Большинство промышленных баз данных в настоящее время ориентируется на реляционную модель, которая обладает рядом очевидных преимуществ — это простота ре-

лизации, простота пользовательского интерфейса, наличие удобного и простого языка запросов. Однако для задач, которые требуют организации сложных структур данных и разнообразных неоднородных процедур обработки, реляционная модель данных может быть недостаточно эффективна. В этом случае целесообразно выбрать сетевую модель. Иерархическая модель является частным случаем сетевой. Генератор проектов допускает работу и с реляционными и с сетевыми структурами данных.

*Описание прикладных бизнес-серверов.* В прикладной информационной системе может быть один или несколько бизнес-серверов. Прикладные серверы обеспечивают связь пользователей с базами данных и выполнение пользовательских запросов. Для каждого прикладного сервера описывается полный состав выполняемых им бизнес-процедур. Реализация бизнес-процедур основывается на этих описаниях, на описании запросов к базам данных и на описании математических моделей предметной области. Основанием для выполнения бизнес-процедур является пользовательский запрос, который представляет собой входной документ определенной

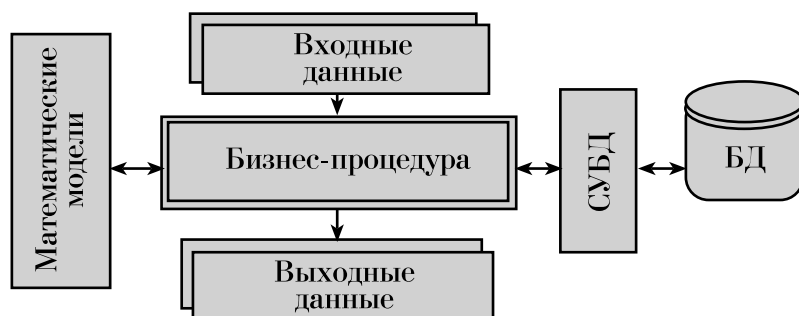


Рис. 2. Схема выполнения бизнес-процедур прикладным сервером

структуры или несколько связанных между собой документов. Результат выполнения пользовательского запроса также представляет собой один или несколько выходных документов. На рис. 2. показана общая схема выполнения любого пользовательского запроса.

Входные и выходные документы представляют определенным образом организованную, структурированную информацию. Структура документов определяется их типом. Типы используемых документов должны быть описаны на этапе построения логических структур данных. Бизнес-процедуры в процессе исполнения обращаются к математическим моделям, которые могут быть реализованы в виде библиотек программ или использоваться в режиме интерпретации.

*Описание пользовательского интерфейса.* Исполнение бизнес-процедур инициируется пользователями, которые посылают на серверные компоненты свои запросы с помощью клиентских модулей. Основными объектами описания клиентских модулей являются пользовательские запросы и сценарии (последовательность) их вызовов. Структура пользовательского запроса содержит ссылки на серверные бизнес-процедуры, ссылки на типы входных и выходных документов бизнес-процедур, способы формирования входных документов и формы интерпретации выходных. Фактически клиентские модули обеспечивают пользовательский интерфейс с системой. Других функций у клиентских модулей в рассматриваемой нами архитектуре нет. Пользовательский интерфейс определяется:

- составом пользовательских запросов к прикладным серверам,
- структурой пользовательских меню и команд на всех уровнях клиентских модулей,
- представлением входных и выходных документов в виде экранных форм, диалогов разного типа и твердых копий,
- сценариями формирования и анализа экранных документов,
- структурой диалогов для формирования документов,
- представлением входных и выходных документов в виде форматированных файлов.

Таким образом, если резюмировать все сказанное выше, полноценный проект прикладной информационной системы должен содержать описание

- архитектуры системы,
- совокупности используемых математических моделей,



- логической структуры и моделей данных,
- прикладных серверов и реализуемых ими бизнес-процессов,
- клиентских модулей и реализуемых ими пользовательских запросов к прикладным серверам.

Для представления всех этих компонент проекта должны быть специальные средства, специальный язык описания проектов.

**Язык описания проектов.** Проект программного комплекса или системы представляет собой набор файлов, в которых содержится описание содержательных понятий и объектов разрабатываемой системы, логических структур данных, бизнес-процедур системы и пользовательского интерфейса. Основными объектами языка описания проекта являются:

- реквизиты проекта,
- платформы, для которых предполагается генерация программ,
- пользователи системы,
- типы данных,
- документы,
- сетевые структуры данных,
- реляционные базы данных,
- автоматически генерируемые SQL - запросы,
- произвольные SQL - запросы,
- прикладные серверы,
- порты прикладных запросов,
- WEB - порты серверов,
- бизнес-процедуры прикладных серверов,
- “ручные” программы бизнес-процедур,
- пользовательские окна,
- пользовательские диалоги,
- пользовательские приложения.

**Реквизиты проекта** задают имя проекта и другие выходные данные, связанные с разработкой проекта:

```
project <идентификатор проекта>:
    "<Полное наименование проекта>";
    /version=<номер версии>
    /copyright="<информация о copyright>"
    /author=<информация об авторах описания проекта>
    /baseport=<начальный порт TCP/IP по умолчанию>
    /language=<языки>
```

Под **платформой** в данном контексте подразумевается аппаратная платформа (Intel, VAX, Alpha, Power PC,...), операционная система (MS Windows, Linux, Free BSD, Open VMS), система управления базами данных (MS SQL Server, Oracle, Sybase, MySQL). С точки зрения пользовательского интерфейса платформа может быть основана на использовании Win32 GDI, Motif, Gtk и пр. С точки зрения web-интерфейса можно использовать web-сервера Apache, Microsoft IIS. В Генераторе проектов процесс генерации предусматривает использование разных платформ в рамках одного проекта. Тексты программ для каждой платформы могут быть сгенерированы независимо в разное время.

**Пользователи** генерируемой системы подразделяются на группы. Каждой группе пользователей присваиваются определенные права и функции, которые доступны пользователям данной группы. Структуры, связанные с пользователями системы, описаны в статье [74].

**Типы данных** в описании проекта используются в различных контекстах. Тип данных может задаваться как:

- предопределенный тип данных (numb, char, date, money, ...),
- перечислимый тип (enum, radio, mask),
- структура (struct).

Каждое описание типа вводит уникальный идентификатор типа, программное представление, компоненты и ряд опций.

```
type <имя> : <программное представление>
[(<компоненты>)] {<опции>...}
```

**Понятие документа** является одним из центральных в описании проекта. Документ – это описание типа данных, имеющего сложную внутреннюю структуру:

```
document <имя документа> [ : <имя структурного типа>];
{ record <имя записи> [ : <имя структурного типа >];}...
{ set <имя>[owner <владелец>] member <член набора>};...
```

Имена документов уникальны в пределах проекта. В документе может быть декларировано произвольное количество именованных записей (record). Имена записей уникальны в пределах документа. С записью может быть связан структурный тип. Кроме того, в документе может быть декларировано произвольное количество именованных наборов (set). Имена наборов уникальны в пределах документа. Набор описывает связь между записями документа типа “один ко многим”. Набор может быть последовательным и ключевым. В последнем случае задается ключ в виде последовательности компонент записи – члена набора, по которым в лексикографическом порядке упорядочиваются члены набора автоматически при включении в набор. В последовательном наборе порядок записей задается при их включении указанием номера позиции. Можно также описывать, так называемые сингулярные наборы, у которых отсутствует запись <владелец>. Каждый сингулярный набор в документе представлен ровно одним экземпляром. В некотором смысле владельцем сингулярного набора можно рассматривать сам документ, вернее, экземпляр документа для экземпляра набора.

Описание документа автоматически предполагает наличие в языке описания проекта операторов манипулирования содержимым документа. К таким операторам, в частности, можно отнести следующие действия:

- записать в заданный экземпляр документа структуру;
- считать из заданного документа структуру;
- создать экземпляр записи данного типа с указанием структуры, содержимое которой нужно разместить в записи;
- удалить заданный экземпляр записи;
- считать из заданного экземпляра записи структуру;
- записать в заданный экземпляр записи структуру;
- включить заданный экземпляр записи в экземпляр набора в заданную позицию;
- найти по заданному номеру позиции экземпляра члена набора по экземпляру владельца;
- перейти от заданного экземпляра члена набора к следующему/предыдущему;
- найти экземпляр владельца по заданному экземпляру члена набора;
- для заданного владельца ключевого набора и значения ключа найти соответствующий экземпляр члена набора;

**Сетевые структуры данных.** Модель документа есть не что иное, как хорошо забытая (и совершенно напрасно) модель сетевой базы данных по спецификации КОДАСИЛ. Похожесть на модель реляционной базы данных не в счет, так как там, во-первых, primary/foreign key реализуются в виде ограничений целостности, проверяемых во время модификации, а не в виде физических ссылок. Во-вторых, работа с документом предполагает использование операторов перечисленного выше вида, а не использование SQL-запросов (может быть, в будущих версиях Генератора и это будет реализовано, если где-нибудь понадобится).

**Структуры реляционных баз данных** в проекте описываются в виде совокупности таблиц, индексов и связей между таблицами, которые определяются, как и для сетевых данных, с помощью задания наборов (set):

```
{ table <имя таблицы> : <имя структурного типа>
[(<первичный ключ таблицы>)];
[<опции таблицы>]}...
{index <имя индекса> op<имя таблицы> [unique](<индекс>)}...
{ set <имя набора> owner <имя таблицы-владельца> member
<имя таблицы — членов набора> (<ссылка на владельца>);}...
```

Столбцы (поля) таблицы соответствуют компонентам структурного типа, описывающего таблицу. Первичный ключ и индекс — это списки имен столбцов таблиц. Первичный ключ должен быть заявлен в списке уникальных индексов. В описании набора ссылка на владельца — это список имен столбцов таблиц — членов набора. Ссылка на владельца в наборе должна по типам данных совпадать с первичным ключом владельца набора.

**Автоматически генерируемые SQL-запросы** распространяются только на одну таблицу базы данных. Список автоматически генерируемых запросов задается в опциях к таблице:

```
[select <имя запроса>(<вход>):(<выход>);]...
[insert < имя запроса > (<вход>);]...
[update < имя запроса > (<вход>):(<изменяемые поля>);]...
[delete < имя запроса > (<вход>);]...
[cursor < имя запроса > (<вход>):(<выход>)/(<порядок>);]...
```

Здесь < вход > — это список полей, которые используются в предикате поиска (WHERE), < выход > — выходные переменные запроса.

**Произвольные SQL-запросы**, которые могут быть описаны в проекте, представляются так же, как и автоматически генерируемые запросы, и реализуются в виде функций с входными и выходными параметрами. Для описания этих запросов используется стандартный SQL. Описание произвольных SQL-запросов в проекте имеет следующий вид:

```
sql <имя запроса> (<вход>):[(<выход>)]
<тело запроса на SQL>;
```

В теле запроса входные переменные (<вход>) могут явно использоваться как host-переменные в Embedded SQL для C. Выходные переменные (< выход >) имеют смысл только для поисковых запросов (*select & cursor for select*).

**Прикладные серверы** реализуют бизнес-процедуры. С каждым сервером может быть связана одна или несколько баз данных реляционного или сетевого типа. На рис. 3. приведен пример серверной архитектуры и связи серверов с другими компонентами системы.

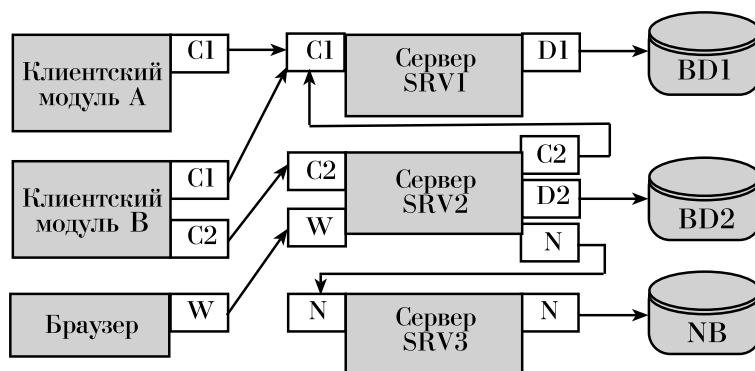


Рис. 3. Пример клиент-серверной архитектуры

Сервер может иметь один или несколько **портов**, которые предназначены для связи с разными типами клиентских модулей. Через каждый порт сервера для пользователей доступны только те бизнес-процедуры этого сервера, которые приписаны к данному порту. Сервер может иметь несколько специализированных портов для исполнения запросов к сетевой базе данных. Сервер может иметь несколько портов, работающих по протоколу HTTP, для реализации WEB-интерфейса пользователей. И, наконец, сервер может иметь несколько клиентских интерфейсов для связи с другими серверами, по отношению к которым данный сервер выполняет роль клиента. На рис. 3

— сервер SRV1 имеет порт C1 для приема пользовательских запросов и интерфейс D1 с реляционной базой данных BD1;

— сервер SRV2 имеет порт C2 для приема пользовательских запросов, порт W для приема HTTP-запросов, клиентское соединение C1 с портом C1 сервера SRV1, интерфейс D2 с

реляционной базой данных BD2, клиентское соединение N с портом N сервера SRV3 для запросов к сетевой базе данных;

— сервер SRV3 имеет порт N для приема запросов к сетевой базе данных и интерфейс ND к сетевой базе данных NBD;

— клиентский модуль A имеет интерфейс C1 с портом C1 сервера SRV1 для передачи пользовательских запросов;

— клиентский модуль B имеет интерфейс C1 с портом C1 сервера SRV1 для передачи пользовательских запросов, интерфейс C2 с портом C2 сервера SRV2 для передачи пользовательских запросов;

— стандартный браузер имеет возможность передать запрос Интернет-порту W сервера SRV2.

Интернет-порт является специальным видом серверного порта, предназначенного для обеспечения санкционированного доступа к бизнес-процедурам серверов системы через Интернет.

Описание прикладного сервера имеет следующий вид:

*server* <имя сервера>;

[*database* <имя базы данных>:<тип реляционной базы данных>]. . .

[*genbd* <имя базы данных>:<тип реляционной базы данных>]. . .

{*port* <имя порта запросов>}. . .

{*gbdport* <имя порта сетевой базы>}. . .

{*client* <имя соединения> *port* <имя порта>}. . .

{*web* <имя web-порта>}. . .

{<описание функций>}. . .

{<описание бизнес-процедур>}. . .

Функции, которые описаны в пределах прикладного сервера, носят служебный характер и используются при описании бизнес-процедур.

**Бизнес-процедуры прикладных серверов** — это функции сервера, подключенные к определенному порту:

*request* <имя порта>.<имя бизнес-процедуры>

*input*(<входные документы>)

*output*(<выходные документы>)

*func*{<тело бизнес-процедуры>}

Бизнес-процедуры принимают входные документы от пользователей, обрабатывают их, формируют ответ в виде выходных документов и передают их обратно пользователям. В теле функции бизнес-процедуры могут использоваться любые описанные выше функции, а также функции SQL-запросов используемых реляционных баз данных и операторы работы с сетевыми базами данных.

**Пользовательские окна** — это абстрактное понятие, связанное с внешним представлением описанных в проекте документов. В настоящее время в системе имеются предопределенные оконные классы текстовых окон, таблиц и деревьев. На основе этих классов разработчик может описать именованные оконные типы, задав имена и типы переменных/документов в составе окна, а также задав программы, описывающие поведение окна в разных ситуациях.

*window* <имя окна> *document* <имя документа>

(<входные переменные>)

:( <выходные переменные>)

{*tableview*|*textview*|*treeview*}

[<описание компонент окна, а также управляющих команд >]

**Пользовательские диалоги** представляют собой специальный вид окна, открытие которого блокирует доступ к окну приложения до тех пор, пока пользователь не закроет это окно.

*dialog* <имя диалога> *document* <имя документа>

(<входные переменные>)

:(<выходные переменные>)

[<описание компонент и команд диалога>]

Диалоги используются для ввода данных и для просмотра выводимой в диалог информации. В качестве компонент окна можно использовать разнообразные типовые элементы вроде окон

ввода текста, выпадающих списков, птичек и пр. стандартных элементов. Кроме того, в окне можно использовать в качестве своих элементов описанные ранее окна. Размещение элементов окна управляется многочисленными опциями и специальными контейнерными элементами типа вертикальная коробочка, горизонтальная коробочка и пр.

**Пользовательские приложения** — это клиентские модули, обеспечивающие интерфейс пользователей с бизнес-процедурами серверов. Для приложения может быть объявлено, что оно является клиентом для заданного списка серверов.

*application* <имя пользовательского приложение>;<опции>  
*client* <имя клиента> *port* <имя серверного порта>

С точки зрения пользовательского интерфейса в приложении декларируется список разных оконных видов - макетов, а также управляющие элементы для каждого макета.

*layout* <имя макета размещения окон> *dociment* <имя документа>  
(<входные переменные>):(<выходные переменные>)  
<геометрия размещения окон>  
<описание управляющих команд и других свойств макета>

Макет определяет состав и взаимное расположение описанных выше окон внутри главного окна приложения. Управляющие команды определяют схему активизации окон макета, переход от макета к макету, вызов меню и диалогов, обращение к бизнес-процедурам сервера и тому подобное.

Кроме описанных выше основных понятий и объектов в Генераторе проектов есть ряд предопределенных функций и макросов, предназначенных для описания проекта.

Все упомянутые выше понятия и объекты проекта упорядочены и представлены в различных файлах, совокупность которых составляет полное описание проекта.

Программа Генератора проектов реализована в виде консольного приложения для платформ Win32 и Linux. Для генерации проекта необходимо запустить Генератор в рабочем каталоге описания проекта и указать в качестве параметра идентификатор проекта, а также набор опций для указания требуемых платформ. Для каждой указанной платформы генерируется программный код системы.

Вместе с текстами программ для каждой платформы генерируются скрипты для сборки программ для получения дистрибутивов системы.

С точки зрения состава программных компонент в дистрибутиве могут присутствовать программы следующего вида:

- серверы-программы, обрабатывающие запросы от клиентских программ на выполнение бизнес-процедур;
- клиентские модули с оконным интерфейсом;
- библиотеки программ, обеспечивающие выполнение бизнес-процедур;
- вспомогательные программы — конфигураторы баз данных, CGI-интерфейсы и пр.

Эффективность всякой автоматизации, как правило, измеряется коэффициентом повышения производительности труда. Разумеется, и при применении нашего проектного подхода к разработке прикладных информационных систем хотелось бы иметь такие оценки. Мы могли бы, конечно, привести цифры, тем более, что это не трудно сделать, сравнив объем программного кода и объем проекта системы. В частности, для рассмотренного выше примера такое соотношение составит величину второго порядка, т.е. объем автоматически сгенерированного программного кода (сумма объемов только \*.c, \*.h файлов ~0,7 Мгб) более чем в сто раз превышает суммарный объем исходных файлов проекта (~5 Кбт). Для крупных проектов это соотношение будет поменьше, но все равно оно достигает величины как минимум порядка десятка. Ниже дано краткое описание тех прикладных проектов, которые были разработаны в разные годы средствами Генератора проектов.

**1992 г.: Система обработки почтовых и телеграфных авизо (Заказчик ГУ ЦБ РФ по г. Москве).** Автоматизированная система обработки почтовых и телеграфных авизо была внедрена и эксплуатировалась в течение нескольких лет в Главном расчетно-кассовом центре ГУ ЦБ РФ по г. Москве и Шаболовском РКЦ.

**1993 г.: Система приема и обработки электронных межбанковских платежей "АС МБР" (Заказчик: ГУ ЦБ РФ по г. Москве).** Система обработки межбанковских платежей

в режиме реального времени была внедрена и эксплуатировалась в течение нескольких лет в Главном расчетно-кассовом центре ГУ ЦБ РФ по г. Москве и Шаболовском РКЦ.

**1996–1999 гг.: Система автоматизации банковской деятельности коммерческих банков и Учреждений Сбербанка РФ.** Система комплексной автоматизации многофилиального универсального коммерческого банка (ГАМБИТ) разработана, внедрена и эксплуатируется в Башкирском банке Сбербанка России. Система автоматизирует деятельность главной бухгалтерии банка, ОПЕРУ, территориального расчетного центра, отделений банка.

**1998–1999 гг.: Система урегулирования взаимной задолженности субъектов экономической деятельности РПБ КЛИРИНГ (Заказчик: КБ “Роспромбанк”).** Автоматизированная система представляет собой программно-технологический комплекс, предназначенный для проведения работ по взаимному многостороннему урегулированию просроченной задолженности субъектов экономической деятельности на региональном и федеральном уровнях.

**1999 г.: Пилот-проект “Electronic Transcribing System”. (Заказчик: “BrainStorm Engineering, LLC”, США.)** Прототип многопользовательской автоматизированной системы для распределенной обработки медицинской информации через Internet.

**1999–2000 гг.: Проект eCommerce. (Заказчик: Сбербанк РФ.)** Был разработан и сертифицирован проект электронной коммерции. Разработана система интернет-платежей, которая позволяет производить оплату товаров и услуг в интернет-магазинах в режиме реального времени с помощью микропроцессорных карт СБЕРКАРТ Сбербанка России.

**2002-2003 гг.: Проект системы Duplet. (Заказчик: ООО “Про-Кард”)** Разработан и внедрен проект автоматизированной системы DUPLET, предназначенной для обеспечения интернет-торговли и проведения некоторых банковских операций в режиме реального времени с микропроцессорными картами стандарта DUET (карты СБЕРКАРТ Сбербанка России), эмитированных платежными системами с разными генеральными ключами.

**2002-2003 гг.: Проект системы мобильного банкинга. (Разработчик системы: ЗАО “СмартКард Сервис”).** Система мобильного банкинга предназначена для предоставления клиентам коммерческих банков услуг безопасного управления банковским счетом с использованием личного мобильного телефона. Для обмена данными между банком и клиентом используется служба коротких сообщений (SMS).

Это неполный перечень тех прикладных информационных систем, которые были реализованы с помощью Генератора проектов. Безусловно Генератор обеспечивает очень высокую производительность для разработчиков прикладных систем. Однако даже не в конкретных цифрах увеличения производительности труда разработчиков состоит основной эффект от применения Генератора проекта. Главное преимущество проектного подхода состоит в том, что он не перемешивает две области деятельности – содержательное моделирование прикладных задач и технологические проблемы программирования. Благодаря этому появляется возможность достаточно глубокой формализации на этапе постановки задачи, т. е. в процессе проектирования системы. С другой стороны средства проектирования, т. е. правила описания системы, их форма и содержание, однозначно соответствуют доступной в данный момент технологии создания программ, которая заложена в Генераторе проекта и той структурной модели, на которую опирается Генератор. Развитие структурной модели, расширение возможностей автоматической генерации программ будут совершенствоваться и средства проектирования. В связи с этим нам представляется, что дальнейшее углубление проектного подхода, разработка более мощных языковых средств описания содержательных объектов, моделей и процедур, может быть даже их специализация и ориентация на конкретные предметные области, являются весьма актуальными задачами для разработчиков прикладных информационных систем.

### **3. Автоматизации проектирования вычислительных систем реального времени**

Вычислительные системы реального времени предназначены для контроля и управления в режиме реального времени процессами в автоматизированных производствах, транспортных системах, системах производства энергии, в нефте- и газодобывающих производствах, при разработке и испытаниях сложных технических объектов, многих других областях человеческой деятельности. В секторе проектирования систем реального времени ВЦ РАН разработана методология создания системы автоматизации программирования вычислительных систем реального

времени (САПР ВСРВ) [75, 76]. Система предназначена для автоматизации проектирования и генерации систем реального времени, осуществляющих обработку циклически поступающей информации в темпе поступления при жестких временных ограничениях. Эта система, во-первых, позволяет в короткие сроки в автоматическом режиме проектировать из готовых прикладных модулей конкретную ВСРВ, описанную пользователем с помощью программы реального времени (РВ-программы), и, во-вторых, заранее, т.е. до обработки информации в реальном времени, проводить оптимизацию вычислений. Для реализации такого подхода необходимо предварительно построить математическую модель ВСРВ. С помощью этой модели могут быть решены такие задачи, как составление допустимого расписания выполнения процессов, синхронизация вычислений, динамическое распределение памяти. При разработке этой системы был получен ряд вспомогательных результатов, которые представляют отдельный теоретический и практический интерес. Например, были созданы и реализованы наглядные языковые средства для описания циклической обработки информации, разработаны различные алгоритмы дискретной оптимизации для ВСРВ, которые составляют основу системы.

**3.1. Алгоритмы дискретной оптимизации для многопроцессорных ВСРВ.** Предлагается пакет алгоритмов, предназначенных для планирования работ в многопроцессорных системах реального времени. В общем виде задача может быть сформулирована следующим образом. Имеется множество вычислительных заданий (работ)  $N = \{1, \dots, n\}$  и  $m$  процессоров  $r$  типов. Для каждого задания  $i \in N$  известны следующие характеристики:  $[b_i, f_i]$  — директивный интервал (выполнение задания  $i$  может быть начато не ранее момента  $b_i$  и должно быть завершено не позднее момента  $f_i$ );  $Q_i$  — объем работы процессоров, необходимый для полного выполнения задания  $i$ . Для каждого процессора задана производительность  $s_j$ . Если задание  $i$  выполняется процессором  $j$  в течение интервалов времени суммарной длины  $\tau_{ij}$ , то  $Q_i = \sum_1^m s_j \tau_{ij}$ . В случае, когда производительности всех процессоров одинаковые, вместо величин  $Q_i$  задаются длительности  $t_i$  выполнения заданий. В фиксированный момент времени каждое задание может выполняться только одним процессором, а каждый процессор может выполнять не более одного задания. В случае, когда допускаются прерывания и переключения, предполагается, что прерывание выполнения работы на процессоре  $j$  с целью ее переключения на одном из последующих тактов на другой процессор или для возобновления на этом же процессоре может потребовать некоторых временных затрат системы. Задан граф связей между процессорами, отражающий возможность переключения работы с одного процессора на другой. Требуется определить, существует ли допустимое расписание выполнения заданий (когда каждое задание полностью выполняется в своем директивном интервале), и если оно существует, то найти его. Сформулированная задача является  $NP$ -полной. Поэтому нами были рассмотрены различные частные случаи этой задачи и, кроме того, разработаны эвристические алгоритмы.

**3.1.1. Построение расписаний с прерываниями.** В случае, когда граф связей между процессорами полный, допускаются прерывания и переключения и они не сопряжены с временными затратами, для поиска допустимых расписаний можно воспользоваться полиномиальными алгоритмами, описанными в работах [77–79]. Однако ограничения, связанные со структурой используемой ЭВМ, и специфика каждого конкретного случая требуют рассмотрения следующих задач.

*Циклическость поступления требований на выполнение заданий.* Требования на выполнение задания  $i \in N$  поступают циклически с периодом  $p_i$ , начиная с момента времени  $p_{0i}$  (т.е.  $k$ -е требование ( $k = 1, 2, \dots$ ) на выполнение задания  $i$  поступает в момент времени  $p_{0i} + (k - 1)p_i$ ). Для  $k$ -го требования на выполнение задания  $i$  установлен директивный срок  $p_{0i} + (k - 1)p_i + f_i$ . Для решения этой задачи разработан полиномиальный алгоритм, основанный на сведении ее к задаче поиска максимального потока в сети специального вида [80]. Алгоритм строит периодическое допустимое расписание с периодом  $P$ , равным наименьшему общему кратному величин  $p_1, \dots, p_n$ . Вычислительная сложность алгоритма есть  $O((rP \sum_{i=1}^n 1/p_i)^3)$ .

*Учет ограничений на структуру связей между процессорами.* Для случая, когда граф связей между процессорами — произвольный связный граф, временные издержки при прерывании выполнения работ и их переключениях с одного процессора на другой не учитываются, все процессоры идентичные, разработан полиномиальный алгоритм нахождения допустимого

расписания [81]. Алгоритм основан на преобразовании с помощью ряда новых алгоритмов расписания для полного графа в расписание для заданного неполного графа связей между процессорами. При этом предполагается, что НОД  $(b, b_2, \dots, b_n, f_1, f_2, \dots, f_n, t_1, t_2, \dots, t_n) \geq 2m$  (НОД — наибольший общий делитель). Доказано, что если указанное условие не выполняется, то задача является  $NP$ -полной в сильном смысле. Вычислительная сложность алгоритма есть  $O(n^4 m^2 + n^3 \ln T)$ .

Рассмотрен также случай, когда учитываются издержки на обработку прерываний и переключений. Предполагается, что при каждом прерывании или переключении некоторой работы с процессора на процессор системой дополнительно выполняется некоторое число тактов для записи текущего состояния работы, а при возобновлении — столько же тактов на чтение. Доказано, что в этом случае сформулированная задача становится  $NP$ -полной в сильном смысле даже для однопроцессорной системы, когда все работы имеют общий директивный срок. Для решения задачи разработан метод последовательных приближений, основанный на последовательной модификации потоковой сети, используемой в алгоритме, описанном в [77].

Рассмотрен также частный случай, когда все работы имеют общий директивный интервал, издержки на прерывания не учитываются, но при первой загрузке каждой работы, а также при переключении на процессор, на котором эта работа еще не выполнялась, требуется процессорное время на загрузку данных. Эта задача сведена к многопродуктовой потоковой задаче в сети специального вида. Для решения этой задачи также разработан и другой подход, который основан на ее сведении к задаче целочисленного линейного программирования, но с существенно меньшим числом переменных и ограничений.

*Эвристические алгоритмы.* Для случая, когда прерывания и переключения не требуют временных издержек, один из наиболее эффективных известных точных алгоритмов находит решение, выполняя  $O(r^3 n^3)$  операций [77–79]. При этом в построенном расписании не более  $2(n^2 + 2mn - 3n - m + 1)$  прерываний. Несмотря на то, что этот алгоритм полиномиальный, время его работы часто является недопустимо большим при использовании в ВСРВ. Поэтому для решения сформулированной задачи разработаны два эвристических алгоритма [82]. Оба эти алгоритма были разработаны как варианты обобщения однопроцессорного алгоритма Коффмана [83] на случай, когда имеется несколько процессоров с различными производительностями: готовой к выполнению работы с меньшим директивным сроком назначается больший приоритет. В первом алгоритме на освободившийся процессор назначается работа с наивысшим приоритетом. Во втором алгоритме при завершении одной из работ все процессоры освобождаются и назначаются  $m$  работ так, что работе с большим приоритетом предоставляется более быстрый процессор. Вычислительная сложность алгоритмов есть  $O(mn)$  и  $O(n^2 \log_2(n))$ , а число прерываний в находимых ими расписаниях не более  $n - 1$  и  $2m(n - 1)$  соответственно. Как показали многочисленные машинные эксперименты (было проведено свыше 2500 расчетов), время работы обоих алгоритмов в сотни, а в некоторых случаях в тысячи раз меньше времени работы точного алгоритма. Эти эксперименты показали также, что уровень корректной работы первого алгоритма — порядка 80%, второго — порядка 95%. Иными совами, второй алгоритм только в 5% случаях выдавал сигнал об отсутствии допустимого расписания, в то время как оно на самом деле существовало. Поэтому, несмотря на то, что второй алгоритм требует несколько больших вычислительных затрат, именно он может быть рекомендован для практического применения.

Разработаны также модификации обоих алгоритмов для случая, когда каждое прерывание требует определенного количества процессорного времени. При этом вычислительная сложность обоих алгоритмов остается прежней. Однако из-за существенно большего количества прерываний в расписаниях, которые генерирует второй алгоритм по сравнению с первым, в этом случае не имеет места однозначная предпочтительность применения второго эвристического алгоритма перед первым. Поэтому был исследован вопрос, начиная с какого соотношения характерного интервала между соседними директивными сроками к некоторой величине, характеризующей среднее время, затрачиваемое на прерывание, первый алгоритм становится более предпочтительным, чем второй. Были исследованы три различные модели образования временных затрат на обработку процессорами прерываний и переключений: 1) затраты равны некоторым постоянным величинам; 2) затраты обратно пропорциональны производительности процессора; 3) затраты



имеют как постоянную, так и переменную, зависящую от процессора, составляющие. Для каждой из моделей экспериментальным путем определяется искомое соотношение (зависящее от параметров модели), начиная с которого первый алгоритм становится более предпочтительным для практического применения, чем второй.

*Учет ограничений на объем памяти.* Дополнительно учитываются временные издержки на обработку прерываний и переключений, а также ограничения на объем памяти процессоров. Для каждой работы предполагается заданным объем памяти процессора, необходимый для ее выполнения. Известен также объем памяти каждого процессора. Указанная задача сведена к многопродуктовой потоковой задаче в сети специального вида. Для однопроцессорного случая разработан полиномиальный алгоритм, вычислительная сложность которого есть  $O(n^2 \log n)$  [84].

*Задача синтеза.* При предположении цикличности поступления требований на выполнения заданий определяется множество  $S = \{(s_1, \dots, s_m)\}$  производительностей процессоров, при которых существует допустимое расписание. Показано, что множество  $S$  задается системой кусочно-линейных неравенств.

### 3.2. Построение расписаний без прерываний.

**3.2.1. Применение агрегирования в задаче составления оптимального расписания без прерываний.** Рассматривается многопроцессорная система, состоящая из  $m$  идентичных процессоров. Заданы длительности выполнения работ. Требуется построить оптимальное по быстродействию расписание выполнения работ без прерываний. Известно, что данная задача является  $NP$ -полной. Поэтому при ее решении чрезвычайно актуальной становится задача понижения размерности, состоящая в разбиении исходного множества работ на несколько подмножеств меньшего размера. Разработаны алгоритмы, состоящие в построении дерева агрегирования и решения в каждом из узлов подзадачи упорядочения [82]. Система подзадач строится путем декомпозиции исходного набора заданий на систему наборов меньшей размерности. После решения подзадач проводится агрегирование набора заданий. Другими словами, этот подход содержит следующие основные элементы: последовательное разбиение задачи на подзадачи упорядочения существенно меньшей размерности, формирование дерева подзадач, решение подзадач, формирование решения задачи из решения подзадач в соответствии с построенным деревом подзадач.

Проведенные многочисленные машинные эксперименты показали высокую эффективность алгоритма. Так, при решении задач составления оптимального расписания для 1000 работ на 4 процессорах время работы алгоритма на персональном компьютере средней мощности составляло несколько секунд. При этом отклонение полученных решений от нижней оценки расписания не превышало 5%.

Рассмотрен случай, когда длительности выполнения работ образуют арифметическую прогрессию или последовательность, близкую к арифметической прогрессии. Для такой задачи предложен эффективный приближенный алгоритм и получены формулы для длины расписания и погрешности метода. Полученные результаты многочисленных машинных экспериментов показали, что предложенные методы в большинстве случаев дают решения, отличающиеся по качеству от оптимальных на несколько процентов.

Для практического применения метода агрегирования при решении подзадач меньшей размерности и композиции решения исходной задачи из решений подзадач были разработаны следующие алгоритмы и программы.

*Эвристический метод.* В качестве эвристики выбран следующий алгоритм. На каждом шаге выбирается задача с наибольшей длительностью и назначается на процессор, для которого суммарное время выполнения уже назначенных задач наименьшее. Вычислительная сложность алгоритма есть  $O(n \log m)$ .

*Переборный метод.* В этом методе либо выполняется полный перебор, либо применяется метод “ветвей и границ”.

*Декомпозиция.* Разбиение задачи на подзадачи производится по минимуму расстояния (разности времен выполнения).

*Комбинированный метод.* Процедура применения этого метода следующая. В каждой из подзадач меньшей размерности упорядочение выполняется путем перебора. Решение же агрегированной задачи строится с помощью эвристического алгоритма.

*Многоуровневый метод.* Каждая из подзадач, в свою очередь, также разбивается на более мелкие задачи. Этот процесс может повторяться несколько раз, что определяет глубину агрегирования.

*Одинаковые директивные интервалы.* Для задачи поиска допустимого расписания, когда каждая работа имеет один и тот же директивный интервал  $[0, T]$ , разработан псевдополиномиальный алгоритм. Вычислительная сложность алгоритма есть  $O(T^m)$ .

Результаты машинных экспериментов продемонстрировали жизнеспособность предложенных методов. При достаточно малом времени работы рассмотренные алгоритмы показали малое отличие от нижней оценки длины расписания. Это позволит использовать предложенные методы в современных детерминированных системах при решении задач большой размерности. Разработанные методы были также обобщены и реализованы для случая, когда процессоры могут иметь различные производительности.

*Алгоритмы организации рестартов.* При функционировании вычислительных систем реального времени важное значение имеет подсистема организации рестартов, позволяющая в случае возникновения сбоев определить те программные модули, которые подлежат повторному запуску. Контроль поступающих в систему данных, а также данных, которыми обмениваются программные модули, осуществляется специальными модулями контроля, каждый из которых определяет, принадлежит ли множество значений контролируемых им параметров заданным пределам. Кроме того, в вычислительную систему реального времени вводятся дополнительные модули-буфера, сохраняющие промежуточную информацию для того, чтобы при рестарте системы воспользоваться данными из этих буферов, а не проводить все вычисления заново. В известной ранее работе [85] строится минимальная зона рестарта и предлагаются схемы обновления расписания работы программы реального времени. Нами решена задача нахождения такого расположения модулей контроля и модулей-буферов, при котором математическое ожидание суммарного времени, затраченного на выполнение всех модулей (включая повторное их выполнение при возникновении ошибок), минимально [86]. При этом для каждого прикладного модуля предполагается заданной вероятность возникновения в нем ошибки. Рассмотрены различные случаи графа частичного порядка между модулями (цепочка, несколько параллельных цепочек, произвольный граф).

*Наличие неопределенных факторов.* Предполагается, что все работы имеют общий директивный интервал  $[0, T]$  и что в некоторые неопределенные моменты времени могут поступать запросы на выполнение более приоритетных работ  $N_1$ . Если при этом выполняются работы из  $N$ , то их выполнение прекращается и откладывается на более позднее время. Тем самым нарушается построенное ранее расписание для  $N$ . Процесс выполнения работ  $N$  и поступления запросов на выполнение более приоритетных работ  $N_1$  повторяется многократно. Задача заключается в выработке такой стратегии построения расписаний выполнения работ  $N$ , при которой время выполнения совокупности работ  $N$  не превосходит  $T$  (если запросы на выполнение более приоритетных работ  $N_1$  не поступают) и вероятность того, что расписание выполнения работ  $N$  будет нарушено вследствие поступления запросов на выполнение работ  $N_1$ , минимальна. Данная задача сводится к решению антагонистической игры специального вида. Разработан приближенный метод решения этой игры, основанный на аппроксимации ее конечными играми [87].

### **3.3. САПР вычислительных систем реального времени (ВСРВ)**

В настоящем разделе дается краткое описание инструментальной системы автоматизации программирования ВСРВ, разработанной под руководством Б.Г. Сушкова. Рассматриваются основные вопросы методологии разработки системы и ее реализации для персональных компьютеров.

#### **3.3.1. Задачи САПР ВСРВ**

Для генерации прикладной ВСРВ пользователю необходимо иметь прикладные модули, написанные на языках программирования, например Си, Фортран, Паскаль или Ассемблер,

и написать на специальном языке реального времени задание на обработку информации в реальном времени — РВ-программу. В этой программе пользователь задает порядок обработки прикладными модулями входных данных и отображения результатов счета по отношению к периоду поступления кадров данных в систему. Если данный порядок обработки может быть соблюден, система обеспечит реализацию заказанной обработки. В противном случае выдается сообщение о невозможности вести указанную обработку. Предусмотрена возможность работы прикладных модулей с несколькими поколениями данных. Система автоматически обеспечивает хранение этих данных в специальных буферах нужное время. Предусмотрена также возможность быстрой реакции на поступление аperiodической информации. Это может быть использовано, например, при возникновении внештатной ситуации с управляемым объектом либо для изменения порядка работы РВ-программы оператором. Также предусмотрено выполнение прикладных модулей в фоновом режиме. Вся остальная работа по генерации прикладной ВСПВ будет выполнена автоматически с помощью разработанной САПР ВСПВ. При этом будут решены следующие проблемы: 1) проблема тупиков при распределении ресурсов вычислительной системы (процессоров, каналов, памяти, периферийных устройств, а также информационных ресурсов, под которыми понимаются используемые в режиме разделения вспомогательные программы и информационные массивы); 2) проблема завершения тех или иных вычислений к определенным моментам времени, указанным пользователем в РВ-программе (соблюдение директивных сроков); 3) проблема сохранения и обновления необходимых наборов поколений данных как поступающих в ВСПВ извне, так и являющихся результатами вычислений с помощью РВ-программы для последующего использования в вычислениях.

При разработке САПР ВСПВ для IBM PC были реализованы: 1) язык реального времени; 2) транслятор с этого языка, включающий блоки синтаксического и семантического анализа, построения сетевой модели вычислений и нахождения допустимого расписания выполнения вычислений, автоматической генерации объектного кода программы реального времени; 3) управляющий монитор, контролирующий вычисления в режиме реального времени. Остановимся кратко на их описании.

**Язык реального времени.** Синтаксис языка реального времени, опуская несущественные детали, может быть описан следующим образом. Основным элементарным объектом языка является модуль — обычный для многих языков программирования оператор процедуры. Все процедуры, участвующие в образовании модулей, составляются заранее и помещаются в системную библиотеку процедур вместе с необходимыми спецификациями формальных параметров.

Фактические параметры любого модуля могут быть РВ-параметрами, константами, простыми переменными, идентификаторами с индексами и т.д. РВ-параметр определяется именем, поставщиком и поколением. Компонента “поставщик” однозначно указывает программный модуль, в котором вычисляется запрашиваемое модулем-потребителем значение параметра с данным именем. Компонента “поколение” определяет момент времени, в который необходимо взять требуемое значение параметра. В этом разделе указывается время, кратное периоду поступления информации от указанного поставщика данных.

Из модулей может быть составлен следующий по иерархии сложности объект языка — цикл реального времени, который состоит из имени РВ-цикла, периода, фазы и тела РВ-цикла. Компонента “период” задает интервал времени, через который будет повторяться выполнение модулей, указанных в теле РВ-цикла. Задание периода аналогично заданию времени для РВ-параметра. Кроме того, период может быть задан в абсолютных величинах времени: секундах, миллисекундах. Параметр “фаза” указывает сдвиг начала работы РВ-цикла относительно начала работы программы. Тело РВ-цикла — это список модулей, РВ-параметры которых могут поставаться из блоков входной информации, из модулей других РВ-циклов и из модулей данного цикла.

Поименованная совокупность РВ циклов образует безусловное, или простое, задание. Безусловное задание может быть снабжено конструкциями предварительной и заключительной части. Они служат для проведения набора специфических действий перед началом работы и соответственно после конца работы простого задания. Здесь может проходить инициализация переменных, каналов связи, переключение режима работы датчиков и т.д. Для облегчения программирования на языке реального времени, в новое простое задание допускается вставить

несколько других простых заданий. В этом случае не придется дублировать исходный текст ранее определенного простого задания. Основную часть простого задания составляют РВ-циклы. Все циклы реального времени, входящие в одно простое задание, должны рассматриваться как выполняющиеся параллельно во времени. Если модули некоторого цикла требуют на свой вход данные, поставляемые другим циклом, то необходимая задержка организуется системой.

В ходе проведения эксперимента может потребоваться изменить режим обработки. Такая возможность предусматривается в языке реального времени введением условного задания, которое состоит из имени задания, вектора условий, таблицы переключений. В разделе “вектор условий” определяется список булевых переменных, от значения которых будет зависеть порядок исполнения программы реального времени. Здесь же указываются начальные значения компонент вектора. Компоненты вектора условий могут быть использованы в качестве входных и выходных параметров РВ-модулем. В разделе “таблица переключений” задаются правила переключения между простыми и условными заданиями в зависимости от конкретных значений вектора условий. Таблица переключений представляется в виде списка значений вектора условий и имени простого или условного задания, на которое требуется переключиться. Таблица переключений должна однозначно определять, на какое задание должно происходить переключение, и содержать строку, соответствующую начальному значению вектора условий. Если для текущего значения вектора условий нет соответствующей записи в таблице переключений, то перехода на другое задание не происходит и продолжается работа программы в старом режиме. Наконец, РВ-программа представляет собой совокупность условных заданий, все таблицы условий которой не содержат ссылок на неописанные задания.

**3.3.3. Основные блоки транслятора и управляющий монитор.** Блок синтаксического и семантического анализа осуществляет синтаксический и семантический анализ конструкций РВ-программы, выдает сообщения о наличии ошибок в РВ-программе, генерирует таблицы данных для работы последующих блоков, вычисляет размеры буферов обмена данными между программными модулями. Блок генерации сетевой модели и расписаний: 1) строит математическую модель вычислений, выполняемых в реальном времени, в виде графа, в котором вершины соответствуют прикладным модулям пользователя, а дуги определяют частичный порядок их выполнения; 2) определяет директивные интервалы выполнения прикладных модулей; 3) определяет существование допустимого расписания выполнения прикладных модулей, и 4) строит его, если оно существует; 5) определяет необходимое количество физических копий для каждого прикладного модуля; 6) вычисляет размеры буферов для входных параметров прикладных модулей. Блок генерации кода формирует на языке С и записывает в текущий каталог исходные тексты получившейся программы, создает ряд вспомогательных файлов для компиляции и редактирования связей. Управляющий монитор обеспечивает работу в реальном времени прикладной программы пользователя, сгенерированной на этапе предварительной обработки посредством САПР ВСРВ. Управляющий монитор является составной частью исполняемого ЕХЕ-модуля РВ-программы. Его функциями являются: прием, хранение и обработка поступающих извне кадров данных; реакция на внешнее аperiodическое сообщение, исполнение команд, вводимых с клавиатуры консоли; переключение между условными и простыми заданиями в соответствии со значениями вектора условий; запуск процессов согласно построенным ранее расписаниям; обмен данными между процессами; действия по окончании работы процесса.

## Литература

1. *Кашин Г.М., Пшеничников Г.И., Флеров Ю.А.* Методы автоматизированного проектирования самолета. М.: Машиностроение, 1979. 165 с.
2. *Краснощечков П.С., Флеров Ю.А.* Методология создания систем автоматизированного проектирования сложных технических объектов // Системный анализ в науке и технике. М.: Наука, 1992.
3. *Флеров Ю.А.* Математическое моделирование объектов проектирования в задачах формирования облика // В сб. “Математическое моделирование и программное обеспечение”. М.: Наука, 1993. 35 с.
4. *Флеров Ю.А.* Декомпозиция и агрегирование в иерархических системах проектирования // Математика и проектирование. М.: Машиностроение, 1994. 44 с.
5. *Краснощечков П.С., Федоров В.В., Флеров Ю.А.* Информационные технологии и автоматизация проектирования сложных технических объектов // Информационные технологии и вычислительные системы. 1995. № 1. 8 с.

6. Краснощеков П.С., Савин Г.И., Флеров Ю.А. Современное состояние и тенденции развития информационных технологий в России. Министерство науки и технической политики. М., 1996. 8 п.л.
7. Краснощеков П.С., Савин Г.И., Федоров В.В., Флеров Ю.А. Автоматизация проектирования сложных объектов машиностроения // Автоматизация проектирования. 1996. № 1. 8 с.
8. Краснощеков П.С., Федоров В.В., Флеров Ю.А. Элементы математической теории принятия проектных решений // Автоматизация проектирования. 1996. № 2. 12 с.
9. Краснощеков П.С., Федоров В.В., Флеров Ю.А. Развитие математической теории принятия проектных решений // Автоматизация проектирования, 1999. № 3(12). 11 с.
10. Рабинович Я.И. Многокритериальная иерархическая процедура улучшения опорного решения // Доклады РАН, Т. 338, № 2. С. 177–179.
11. Рабинович Я.И. Иерархическая многокритериальная процедура улучшения опорного решения в задачах большой размерности // ЖВМ и МФ. 1994. Т. 34, № 12. С. 1770–1781.
12. Рабинович Я.И. Об отыскании слабо эффективных решений // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 2004. Т. 44, № 4.
13. Рабинович Я.И. Построение множества эффективных векторов методом  $\varepsilon$ -возмущений // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 2005. Т. 45, № 5.
14. Задачи и методы автоматизированного проектирования в авиастроении. Сб. работ. М.: ВЦ АН СССР, 1991. 121 с.
15. Катунин В.П. ТАБУС — интегрированная система хранения, обработки и визуализации табличных функций. М.: ВЦ РАН, 1995. 126 с.
16. Kozurev V.P., Yashmanov S.V. Representations of graphs and networks (coding, lay-out, embedding) // J. of Sov. Math. 1992. V.61, № 3. P. 2152–2194.
17. Гереш П.А., Сушков Б.Г., Фуругян М.Г. и др. Оценка параметров газовой залежи с помощью обобщенной динамической модели. М.: ВЦ РАН, 1994. 39 с.
18. Гереш Г.М., Сушков Б.Г., Фуругян М.Г. Регрессионный анализ падения пластового давления в системе “газовая залежь–водонапорный бассейн” // Вопросы методологии и новых технологий разработки месторождений природного газа. Ч. 1. М.: ВНИИГАЗ, 1994. 10 с.
19. Гереш П.А., Гереш Г.М., Сушков Б.Г., Фуругян М.Г. Газодинамическая блочная модель — универсальная методика подсчета запасов газа и управления разработкой месторождений // Современное состояние и перспективы совершенствования методов подсчета запасов газа по данным истории разработки. Материалы н/т совета ОАО Газпром, М., ноябрь, 1999. М.: ИРЦ ОАО ГАЗПРОМ, 2000. С. 191–203.
20. Гереш Г.М., Лебедев В.Ю., Сушков Б.Г., Фуругян М.Г. Особенности оценки начальных запасов при поэтапном вводе в эксплуатацию уникальных залежей углеводородов // Геология, бурение, разработка и эксплуатация газовых и газоконденсатных месторождений на суше и на шельфе. № 6. М.: ИРЦ ОАО ГАЗПРОМ, 1998. С. 30–40.
21. Козырев В.П. Описание и порождение всех минимальных раскрасок интервального графа и решение смежных задач // ЖВМ и МФ. 1996. Т.36, № 5. С. 146–153.
22. Вышинский Л.Л., Гринев И.Л., Катунин В.П., Лабутин И.В., Флеров Ю.А., Широков Н.И. Банковские информационные технологии. Ч.1. М.: ВЦ РАН, 1999. 99 с.
23. Вышинский Л.Л., Гринев И.Л., Катунин В.П., Лабутин И.В., Флеров Ю.А., Широков Н.И. Банковские информационные технологии. Ч.2. М.: ВЦ РАН, 1999. 175 с.
24. Вышинский Л.Л., Гринев И.Л., Флеров Ю.А., Широков А.Н., Широков Н.И. Автоматизация проектирования прикладных информационных систем. М.: ВЦ РАН, 2003. 61 с.
25. Вышинский Л.Л., Гринев И.Л., Флеров Ю.А., Широков А.Н., Широков Н.И. Генератор проектов — инструментальный комплекс для разработки “клиент–серверных” систем // Информационные технологии. 2003. № 1. С. 23–42.
26. Давыдов Э.Г. О некоторых динамических задачах на быстроедействие при распределении нескольких видов ресурсов на сетевых графиках // Вестник МГУ. 1992. Сер. 15, № 1.
27. Давыдов Э.Г. О расстоянии Минковского между двумя выпуклыми многогранными множествами // Вестник МГУ. 1992. Сер. 15. № 2.
28. Давыдов Э.Г. О редукции некоторых задач многократного минимакса со связанными ограничениями // Вестник МГУ. 1992. Сер. 15. № 2.
29. Давыдов Э.Г. О решении некоторых задач многократного минимакса // // Вестник МГУ. 1992. Сер. 15. № 2.
30. Давыдов Э.Г., Багинская С.Н. Об уравнениях Фредгольма I рода // Обратные задачи естествознания, М.: МГУ, 1997.
31. Давыдов Э.Г., Михайлова И.А. О задачах линейного синтеза многопродуктовых сетей // Вестник МГУ. 1997. Сер. 15. № 2.

32. Вышинский Л., Дунин-Барковский В., Флеров Ю., Новодворский И. Моделирование мозжечка — необходимая оставляющая создания электронного мозга // Сумма технологий. 2002. № 1(19). С. 20–28.
33. Вышинский Л.Л., Гринев И.Л., Дунин-Барковский В.Л., Флеров Ю.А., Широков Н.И. Мониторинг, анализ и прогнозирование поведения многоагентных систем на базе нейрокомпьютерной модели мозжечка. М.: ВЦ РАН, 2003. 61 с.
34. Жуков А.Н. Двухкритериальная задача выбора авиадвигателей // Системный анализ в технике. М.: Изд-во МАИ им. С. Орджоникидзе, 1995. № 4. С. 18–36.
35. Жуков А.Н. Об одной модификации ракетно-турбинного двигателя // Вестник Московского Авиационного института. 1996. Т. 2, № 2. С. 30–35.
36. Жуков А.Н. Реактивные двигатели периодического действия: возможные схемы и оценки перспектив применения // Вестник Московского Авиационного института. 1996. Т. 2, № 3. С. 20–31.
37. Жуков А.Н. О возможном направлении развития силовых установок для космических транспортных систем // Вестник Московского Авиационного института. 1996. Т. 3, № 2.
38. Жуков А.Н. Дезагрегирование в задачах проектирования авиадвигателей // Информационные технологии. 2002. № 12. 11 с.
39. Жуков А.Н. Исследование некоторых задач теории реактивных двигателей методами векторной оптимизации // Информационные технологии. 2003. № 10. 10 с.
40. Жуков А.Н. Некоторые вопросы теории и проектирования авиадвигателей. М.: ВЦ АН СССР, 1990. 168 с.
41. Краснощеков П.С., Флеров Ю.А. Иерархия задач проектирования // Задачи и методы автоматизированного проектирования. М.: ВЦ РАН, 1991. С. 3–23.
42. Вышинский Л.Л. Управляющая система и планирование вычислений в САПР // Интерактивная технология в САПР / Тез. докл. IV всесоюзн. совещания по автоматизации проектирования электротехнических устройств. Таллин, 1981. С. 49–50.
43. Вышинский Л.Л., Федоров В.В., Флеров Ю.А. “Опыт организации диалога в САПР”. “Интерактивная технология в САПР”, тезисы докладов IV всесоюзного совещания по автоматизации проектирования электротехнических устройств. Таллин, 1981г. С. 51–52.
44. Вышинский Л.Л., Медведев А.Е., Шиленко В.И., Широков Н.И. Система формирования алгоритмов конструкторско-инженерных расчетов // Автоматизация проектирования и конструирования. II Всесоюзн. совещание. Ленинград, февраль 1983. / Тез. докл. М., 1983 г. С. 103–104.
45. Вышинский Л.Л., Шиленко В.И., Широков Н.И. Инструментальная система ФАКИР для описания моделей и задач в САПР. Организация математического моделирования и управления пакетами прикладных программ в САПР ЛА // Тематический сборник научных трудов. М.: МАИ, 1984, С. 31–34.
46. Вышинский Л.Л., Прибытков Ю.Д., Шиленко В.И., Широков Н.И. Инструментальная система ФАКИР // Известия АН СССР. Техн. кибернетика. 1986. № 3. 6 с.
47. Вышинский Л.Л., Самойлович О.С., Флеров Ю.А. Программный комплекс формирования облика летательных аппаратов // Задачи и методы автоматизированного проектирования в авиастроении. М.: ВЦ АН СССР, 1991. С. 24–42.
48. Вышинский Л.Л. Структура моделей в задачах проектирования // Задачи и методы автоматизированного проектирования в авиастроении. М.: ВЦ АН СССР, 1991. С. 43–51.
49. Вышинский Л.Л., Гринев И.Л., Шиленко В.И., Широков Н.И. Инструментальные средства САПР // Задачи и методы автоматизированного проектирования в авиастроении. М.: ВЦ АН СССР, 1991. С. 52–70.
50. Гринев И.Л., Широков Н.И. Средства управления данными в САПР // Задачи и методы автоматизированного проектирования в авиастроении”. М.: ВЦ АН СССР, 1991. С. 71–80.
51. Катунин В.П. Основы построения программного комплекса летно-технических характеристик в САПР ЛА // Задачи и методы автоматизированного проектирования в авиастроении. М.: ВЦ АН СССР, 1991. С. 81–91.
52. Скобелев С.И., Широков Н.И. Весовой анализ и контроль в САПР ЛА // Задачи и методы автоматизированного проектирования в авиастроении. М.: ВЦ АН СССР, 1991. С. 52–70.
53. Шапиро М.Ю., Шиленко В.И. Автоматизация проектирования электросхем // Задачи и методы автоматизированного проектирования в авиастроении. М.: ВЦ АН СССР, 1991. С. 101–105.
54. Прибытков Ю.Д., Шиленко В.И. Программный комплекс ЭЛМОН // Задачи и методы автоматизированного проектирования в авиастроении. М.: ВЦ АН СССР, 1991. С. 106–120.
55. Катунин В.П. ТАБУС — интегрированная система хранения, обработки и визуализации табличных функций // М.: ВЦ РАН., 1995. 125 с.

56. Краснощеков П.С., Савин Г.И., Федоров В.В., Флеров Ю.А. Автоматизация проектирования сложных объектов машиностроения // Автоматизация проектирования. 1996. № 1.
57. Вышинский Л.Л., Гринев И.Л., Демидов А.Ю., Широков Н.И. Технологии разработки и сопровождения АБС // Банковские технологии. 1997. № 6. С. 44–49.
58. Вышинский Л.Л. Новые правила бухгалтерского учета в системе ГАМБИТ // Банки и технологии. 1997. № 4. С. 36–37.
59. Вышинский Л.Л. Технология перехода на новый план счетов в системе ГАМБИТ // Третий международный форум разработчиков банковских систем. Тез. докл., Москва. 1997. С. 4–6.
60. Гринев И.Л. Проблемы перевода банка на новые информационные технологии. Опыт внедрения системы ГАМБИТ в Башкирском банке СБ РФ // Третий международный форум разработчиков банковских систем. Тез. докл., Москва. 1997. С. 101–105.
61. Вышинский Л.Л., Гринев И.Л., Катунин В.П., Лабутин И.В., Флеров Ю.А., Широков Н.И. Банковские Информационные технологии (Ч. I и II). М.: ВЦ РАН 1999. 272 с.
62. Вышинский Л.Л., Широкова Е.Н. Автоматизированная система биллинга // Автоматизация проектирования финансовых информационных систем. М. ВЦ РАН, 2004. С. 75–86.
63. Гринев И.Л., Логинов А.А., Широков А.Н., Широков Н.И. Система банковского самообслуживания // Автоматизация проектирования финансовых информационных систем. М.: ВЦ РАН, 2004. С. 87–94.
64. Гринев И.Л., Логинов А.А., Широков А.Н., Широков Н.И. Система мобильного банковского обслуживания // Автоматизация проектирования финансовых информационных систем. М.: ВЦ РАН, 2004. С. 95–101.
65. Гринев И.Л., Логинов А.А., Широков Н.И. Система ИНТЕРНЕТ-платежей // Автоматизация проектирования финансовых информационных систем. М.: ВЦ РАН, 2004. С. 102–109.
66. Вышинский Л.Л., Гринев И.Л., Широков Н.И., Щедров В.И. Система урегулирования задолженностей // Автоматизация проектирования финансовых информационных систем. М.: ВЦ РАН, 2004. С. 110–118.
67. Вышинский Л.Л., Гринев И.Л., Флеров Ю.А., Широков Н.И. Проектный подход к разработке информационных систем // Автоматизация проектирования финансовых информационных систем. М.: ВЦ РАН, 2004. С. 8–22.
68. Вышинский Л.Л. Проект банковской системы // Автоматизация проектирования финансовых информационных систем. М.: ВЦ РАН, 2004. С. 63–74.
69. Вышинский Л.Л., Гринев И.Л., Флеров Ю.А., Широков А.Н., Широков Н.И. Генератор проектов – инструментальный комплекс для разработки “клиент-серверных” систем // Информационные технологии и вычислительные системы. 2003. № 1–2. С. 6–25.
70. Вышинский Л.Л., Гринев И.Л., Флеров Ю.А., Широков А.Н., Широков Н.И. Автоматизация проектирования прикладных информационных систем. М.: ВЦ РАН, 2003. 61 с.
71. Широков А.Н. Организация сетевого взаимодействия при автоматизации разработки программных комплексов. М.: ВЦ РАН, 2004, 26 с.
72. Широков Н.И. Генератор проектов // Автоматизация проектирования финансовых информационных систем. М. ВЦ РАН, 2004. С. 23–43.
73. Широкова Е.Н. Генерация программного кода в Генераторе проектов // Автоматизация проектирования финансовых информационных систем”. М.: ВЦ РАН, 2004. С. 57–62.
74. Широков А.Н. Обеспечение информационной безопасности в архитектуре клиент–сервер // Автоматизация проектирования финансовых информационных систем. М.: ВЦ РАН, 2004. С. 44–56.
75. САПР систем реального времени для IBM PC / Под ред. Ю.А. Флерова. М.: ВЦ РАН, 1993.
76. Теория и реализация вычислительных систем реального времени / Под ред. А.В. Мищенко. М.: ВЦ РАН, 1999.
77. Танаев В.С., Гордон В.С., Шафранский Я.М. Теория расписаний. Одностадийные системы. М.: Наука, 1984.
78. Federgruen A., Groenevel H.T. Preemptive Scheduling of Uniform Machines by Ordinary Network Flow Technique // Management Science, March 1986. V. 32, No. 3.
79. Gonzales T., Sahni S. Preemptive Scheduling of Uniform Processor Systems // Journal of the Association for Computing Machinery. January 1978. V. 25, № 1.
80. Фуругян М.Г. Построение периодических расписаний в многопроцессорных АСУ реального времени // Автоматика и телемеханика. 2000. № 9. С. 202–205.
81. Гречук Б.В., Фуругян М.Г. Составление оптимальных расписаний с прерываниями в многопроцессорных системах с неполным графом связей. М.: ВЦ РАН, 2004.
82. Гуз Д.С., Красовский, Фуругян М.Г. Эффективные алгоритмы планирования вычислений в многопроцессорных системах реального времени. М.: ВЦ РАН, 2004.

83. Коффман Э.Г. Введение в детерминированную теорию расписаний // Теория расписаний и вычислительные машины / Под ред. Э.Г. Коффмана М.: Наука, 1984. С. 9–64.
84. Гуз Д.С., Фуругян М.Г. Планирование вычислений в многопроцессорных АСУ реального времени с ограничениями на память процессоров // Автоматика и телемеханика. 2005. № 2. С. 138–147.
85. Белый Д.В., Сушков Б.Г. Модель организации рестартов в системах реального времени. М.: ВЦ РАН, 1996.
86. Гречук Б.В., Фуругян М.Г. Алгоритмы организации рестартов в системах реального времени. М.: ВЦ РАН, 2004.
87. Фуругян М.Г. Решение одной задачи распределения ресурсов в АСУ реального времени при наличии неопределенных факторов // Автоматика и телемеханика. 2002. № 11. С. 167–171.
88. Вышинский Л.Л., Гринев И.Л., Демидов А.Ю., Широков Н.И. Технологические аспекты разработки и сопровождения банковских систем // Банковские технологии. июль–август 1997. № 6. С. 44–49.
89. Жуков А.Н. Об одной задаче теории авиадвигателей // Доклады РАН. Т. 132, № 6. С. 699–701.



## ОТДЕЛ ИМИТАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Ю.Н. Павловский

---

Отдел имитационных систем Вычислительного центра им. А.А. Дородницына Российской академии наук был образован по инициативе академика Никиты Николаевича Моисеева в 1985 г. из сектора с тем же названием, который существовал с 1973 г. в отделе Н.Н. Моисеева. В отделе разрабатываются методы и средства математической имитации сложных процессов, позволяющие продвигать математическое моделирование в новые области исследований и практической деятельности. Работу отдела можно приближенно декомпозировать (см. ниже раздел, посвященный проблеме декомпозиции) на шесть основных направлений.

### **1. Разработка математических моделей конкретных сложных процессов, разработка соответствующих компьютерных имитационных систем, изучение процессов с помощью выполнения имитационных экспериментов и имитационных игр**

Разработка моделей конкретных сложных процессов в различных сферах исследований и практической деятельности, разработка соответствующих имитационных систем и имитирующих комплексов, разработка на их базе средств поддержки процессов планирования, проектирования, управления является основой для методологических и теоретических исследований, о которых будет идти речь в следующих разделах. Ниже кратко описываются несколько разработанных в отделе моделей конкретных сложных управляемых процессов, созданные на базе этих моделей компьютерные системы имитации, характеризуются результаты исследований, полученные путем выполнения имитационных экспериментов и имитационных игр.

1. *Имитация процессов проектирования, производства, эксплуатации технических систем.* Совместно с Научно-исследовательским институтом автоматических систем Министерства авиационной промышленности СССР была разработана математическая модель процесса эксплуатации технических систем. Основной внутренней характеристикой (см. раздел, посвященный методологическим аспектам) этой модели является возрастное распределение технических систем, выполняющих определенную функцию в народном хозяйстве (например, самолеты, автомашины, вагоны, локомотивы, здания и сооружения, трубопроводы и т.д.). На основе этой модели создана интерактивная компьютерная система имитации для поддержки процедур согласования процессов проектирования, производства технических систем, производства запасных частей к ним, мощности ремонтных служб, а также параметров других систем, обеспечивающих процесс эксплуатации.

2. *Имитация вооруженной борьбы в космосе.* 23 марта 1983 г. Президент США Р. Рейган объявил о намерении создать в США широкомасштабную систему противоракетной обороны с элементами космического базирования. Это намерение получило название “стратегическая оборонная инициатива” (СОИ). В течение 1984–1988 гг. совместно со специалистами из Министерства общего машиностроения СССР в отделе был выполнен цикл исследований, ориентированных на выяснение эффективности СОИ. В рамках этих исследований был разработан ряд моделей, описывающих различные эпизоды вооруженной борьбы в космосе, созданы соответствующие компьютерные комплексы и выполнены имитационные эксперименты, ориентированные на выяснение вопросов эффективности различного оружия, предназначенного для вооруженной борьбы в космосе, а также возможности технической реализации информационного процесса, обеспечивающего эту борьбу, оценку возможной эффективности систем противоракетной обороны (ПРО). Одной из таких моделей была модель функционирования системы противоракетной обороны космического базирования, основанная на технологии “бриллиантовых камней” (brilliant pebbles). С использованием инструментальной системы имитационного моделирования MISS (см. раздел, посвященный инструментальным средствам имитационного

моделирования) был разработан соответствующий компьютерный комплекс. Идея создания системы ПРО, появившаяся в США в рамках СОИ, состояла в выведении большого числа (до 100 000) легких и дешевых ракет, которые получили название "бриллиантовые камни", способных перехватывать межконтинентальные баллистические ракеты (МБР) на их активном участке полета. Созданная модель и соответствующий интерактивный компьютерный комплекс позволяют оценивать эффективность такой системы в зависимости от ее технических характеристик (количество камней, их орбитальная структура, параметры бортовой информационной системы, запас характеристической скорости и т.д.), а также в зависимости от технических характеристик МБР. Расчеты показали, что современные технические возможности не позволяют создать ПРО, основанную на технологии "бриллиантовые камни", способную отразить массовую атаку МБР. Разрабатываемая сейчас в США система ПРО также не способна отразить массовую атаку МБР.

3. *Имитация экономической динамики системы древнегреческих полисов.* Совместно с историками была разработана математическая модель экономической динамики древнегреческих полисов (городов-государств) в период Пелопонесской войны в 431–404 гг. до н.э. Суть выполненного исследования состояла в идентификации этой модели, т.е. в определении ее внешних характеристик (см. раздел, посвященный методологическим аспектам). Этими внешними характеристиками были данные о численности слоев населения, производительности труда в ремесленном и сельскохозяйственном производствах, о ценах, объемах ввозимых и вывозимых товаров и т.д. Часть этих параметров можно оценить по той информации, которая имеется в источниках, значительная же часть параметров, необходимых для воспроизведения экономической динамики, неизвестна. Эти неизвестные параметры подбирались так, чтобы воспроизводимая экономическая динамика соответствовала имеющейся отрывочной информации об экономике древнегреческих полисов, относящейся к разным моментам в течение изучаемого периода, а также не противоречила представлениям экспертов, участвующих в исследовании, о характере происшедших процессов. Тем самым выполнялся системный анализ сохранившейся в источниках информации об изучаемом периоде, проводилась реконструкция исторического процесса. Инструментами, с помощью которых это делалось, являлись математическая модель, компьютер и представления экспертов о характере изучаемого процесса.

4. *Имитация развития взаимоотношений в системе государств.* Выполнялся цикл исследований, посвященных разработке имитационных моделей развития взаимоотношений в системе государств, разрабатывались соответствующие имитационные системы и организовывались имитационные эксперименты и имитационные игры. Эти исследования, поддерживавшиеся в разные периоды государственными и частными структурами, были начаты в начале семидесятых годов и с некоторыми перерывами продолжают до настоящего времени. Разработанные модели позволяли вычислять экономическую динамику государств в некоторой их системе и развитие вооруженных конфликтов между ними, если таковые случались, при заданных экономических и военных параметрах и государственных управлениях экономикой и вооруженными силами. В разных имитационных играх ставились разные конкретные цели. Примерами таких целей является изучение механизмов возникновения вооруженных конфликтов в системе государств (в частности, *информационных аспектов таких механизмов*), а также проблем стратегической стабильности в системе государств.

5. *Имитация вооруженной борьбы на сухопутном театре военных действий.* Совместно с рядом организаций Министерства обороны СССР были разработаны математические модели вооруженной борьбы на сухопутном театре военных действий. Современная вооруженная борьба трактовалась как совокупность одновременно протекающих, разнородных по своему внутреннему характеру и существенно взаимосвязанных процессов:

- процесса взаимного уничтожения войск конфликтующих противников;
- процесса их перемещения по театру военных действий; процесса их материально-технического обеспечения;
- информационного процесса (процесса сбора, хранения, передачи, обработки информации о своих силах и средствах и о силах и средствах противника);
- процесса принятия решений в органах управления войсками.

Были созданы соответствующие компьютерные системы имитации, выполнены имитационные эксперименты, ориентированные на исследование эффективности различных компонент вооружений и военной техники, в частности их информационных компонент

6. *Имитация демографических, экономических, экологических процессов в системе государств на характерных временах, соизмеримых со временем жизни поколения.* Совместно со специалистами Института проблем устойчивого развития при Государственном химико-технологическом институте им. Д.И. Менделеева была разработана математическая модель, описывающая на характерных временах порядка нескольких десятилетий экологические, экономические, демографические процессы в системе государств, ориентированная на изучение проблемы устойчивого развития (sustainable development) мирового сообщества.

В рамках этой модели подвергались имитации следующие виды деятельности:

- фундаментальная наука, производящая новые знания о природе и обществе;
- прикладная наука, использующая эти знания для производства новых технологий;
- добыча природных ресурсов;
- производство предметов потребления с помощью добытых природных ресурсов, технологий, производимых прикладной наукой, а также с помощью людей, обладающих необходимым уровнем образования и квалификации (см. ниже);
- образование, производящее квалификацию людей, необходимую для осуществления производственных процессов в соответствии с используемыми технологиями;
- здравоохранение, производящее коэффициенты рождаемости и смертности людей (более точно — зависимости этих коэффициентов от уровня жизни, уровня образованности, степени загрязнения окружающей среды);
- экологическая деятельность, производящая параметры окружающей среды;
- информатика (сбор, хранение, обработка, передача информации);
- производство духовных ценностей (искусство, культура, религия);
- производство вооружений.

С помощью гуманитарного анализа, использующего понятия и представления, появившиеся в результате составления модели (см. раздел, посвященный методологическим аспектам имитационного моделирования), был сделан ряд выводов, касающихся возможных кризисов глобального характера, связанных с несогласованностью развития перечисленных выше отраслей производства. Модель была использована для разработки компьютерного комплекса, реализующего *имитационную игру*, иллюстрирующую некоторые аспекты проблемы устойчивого развития. *Имитационная игра* эксплуатируется как инструмент поддержки образовательных курсов, посвященных устойчивому развитию.

## **2. Методологические аспекты имитационного моделирования. Технологии, объединяющие методы математического моделирования и гуманитарные методы анализа и прогноза сложных процессов**

В проводимых ниже рассуждениях математическая модель будет трактоваться как система соотношений между характеристиками моделируемого процесса (системы, явления). Эти характеристики делятся на два класса — класс внутренних характеристик (эндогенных, фазовых переменных) и класс внешних характеристик (экзогенных, параметров). Упрощая и огрубляя, можно сказать, что внутренние характеристики — это те, которые намереваются узнать, обращаясь к средствам математического моделирования. Внешние характеристики — это те, которые существенно влияют на внутренние, но обратного влияния в пределах точности, необходимой с практической точки зрения, не имеет место. Модель будет называться замкнутой, если при известных значениях внешних характеристик соотношения модели позволяют определить ее внутренние характеристики.

Термины “имитация”, “имитационное моделирование”, “имитационный эксперимент” возникли первоначально в теории вероятностей и математической статистике для обозначения метода вычисления статистических характеристик случайных процессов, когда соответствующие аналитические формулы либо очень сложны, либо вообще не существуют: случайный процесс многократно воспроизводится с помощью его математической модели (если таковую

удается построить) и полученные результаты обрабатываются методами математической статистики. Другими словами, экспериментальные измерения значений характеристик реального случайного процесса заменяются значениями этих характеристик, полученными с помощью математической имитации этого процесса. Вскоре после начала использования математических методов в управлении, планировании, исследовании операций, проектировании термины “имитация”, “имитационное моделирование”, “имитационный эксперимент” приобрели в этих областях смысл, не совпадающий с их первоначальной трактовкой. Некоторым образом разрабатываются варианты управлений (планов, конструкций). Затем эти варианты сравниваются. Для этого при каждом таком варианте процесс (функционирование проектируемого изделия) воспроизводится с помощью его математической модели. Сравнение может выполняться по некоторым формальным критериям, а может носить неформальный характер, причем, чем сложнее используемая модель, чем больше она содержит реальных факторов, влияющих на принятие решений, тем более естественна неформальная оценка сравниваемых результатов. Математические модели, ориентированные на такое использование, получили название “имитационных”, процесс их составления стал называться “имитационным моделированием”, а каждая акция воспроизведения процесса (функционирования проектируемого изделия) — “имитационным экспериментом”. Если изучаемый процесс случаен (если он достаточно “сложен”, то почти неизбежно он случаен), то для сравнения, о котором шла речь выше, необходимо выполнять то, что в теории вероятностей и математической статистике называется имитацией. Даже если дело обстоит таким образом, специалисты в области управления, планирования, проектирования, исследования операций, произнося слово “имитация”, будут иметь в виду не способ вычисления характеристик случайных процессов путем набора статистики (для них это необходимая техническая деталь), а то, что альтернативные варианты управлений (планов, конструкций) являются внешними по отношению к модели процесса, задаются “извне” ее, а не являются ее продуктом. Суммируя сказанное, можно отметить, что “имитационная модель” (как этот термин понимается большинством специалистов, занимающихся прикладными исследованиями) — это модель, обладающая некоторыми качествами из следующего набора:

- сложность;
- наличие в ней случайных факторов;
- описание процесса, развивающегося во времени;
- наличие экзогенных управлений;
- невозможность получения результатов без использования компьютеров;
- наличие иллюзии реальности.

Математическая модель, претендующая на право именоваться имитационной, не обязана обладать всеми перечисленными качествами одновременно. Однако если этих качеств мало, они должны быть выражены достаточно ярко.

Проблемно ориентированная имитационная система — это совокупность средств информатики, поддерживающих эксплуатацию имитационной модели. В русскоязычной научной литературе термин “имитационная система” появился первоначально в статье *Моисеев Н.Н., Евтушенко Ю.Г., Краснощеков П.С., Павловский Ю.Н. Имитационные системы // Экономика и организация промышленного производства. Новосибирск: Наука СО, 1973. № 6. С. 39–46.*

*Инструментальная система имитационного моделирования* — это совокупность средств информатики, поддерживающих разработку проблемноориентированных имитационных систем.

Математическое моделирование будет трактоваться как *технология*, встроенная в производственный процесс и процесс потребления. Без технологии математического моделирования ни современная производственная структура, ни современная структура потребления существовать не могут так же, как они не могут существовать без энергетики, транспорта и т. д. Технология математического моделирования включает в себя следующие основные этапы:

- составление модели;
- проверка замкнутости, формирование и программирование процедур вычисления внутренних характеристик (в более общем смысле — их функций, называемых “показателями”) при известных внешних характеристиках;
- идентификация (калибровка) модели, т. е. определение ее внешних характеристик;
- верификация модели, т. е. определение условий и границ ее адекватности;

— эксплуатация модели, т.е. выполнение акций анализа (извлечения следствий из соотношений модели) и прогноза моделируемого процесса (системы, явления).

Математические модели “живут” по тем же законам, по которым “живут” технические изделия, используемые в производственном процессе и/или в процессе потребления.

Исследования в области развития технологий, объединяющих возможности гуманитарных и математических методов анализа и прогноза сложных процессов, явлений, систем были инициированы академиком Н.Н. Моисеевым. Ниже излагаются те представления о соотношении математических и гуманитарных методов, которые имеются в настоящее время в отделе и которые являются результатом совместной работы с экспертами — гуманитариями при разработке *конкретных моделей* (см. раздел, посвященный конкретным моделям).

Явления, процессы, системы, прогноз которых (в пределах практически необходимой точности) доступен в настоящее время средствами математического моделирования, предлагается называть “простыми”. (Примером “простого” процесса является движение центра масс кометы Галлея в окрестности Солнца, если прогноз этого движения необходимо осуществить с точностью, позволяющей вывести ракету в окрестность кометы для выполнения фотоснимков ее ядра.) Тогда естественно называть сложными те явления, процессы, системы, прогноз которых с необходимой для практики точностью недоступен сейчас средствами математического моделирования, однако этот прогноз может быть дан экспертами — специалистами в соответствующей сфере деятельности. (Примером “сложного” процесса является развитие болезни у пациента, если правильный прогноз этого развития может выполнить опытный врач.) Методы получения таких прогнозов предлагается называть “гуманитарными” (“экспертными”, “интуитивными”). Введенная терминология (предложенная Н.Н. Моисеевым в частной беседе с автором настоящей статьи) подчеркивает очевидный аспект двойственности между математическими и гуманитарными методами анализа и прогноза. Альтернативной терминологией является трактовка математических методов анализа и прогноза как “жестких”, гуманитарных — как “мягких”.

Деление явлений, процессов, систем на “простые” и “сложные” (т.е. методов их анализа и прогноза на “жесткие” и “мягкие”) не является исчерпывающим. Имеются явления, процессы, системы, прогноз которых не доступен в настоящее время ни математическим, ни гуманитарным средствам. Кроме того, граница между математическими и гуманитарными средствами анализа и прогноза не является неподвижной. По мере развития технологии математического моделирования некоторые явления, процессы, системы, ранее бывшие “сложными”, т.е. не доступными этой технологии, превращаются в “простые”: математические методы анализа и прогноза как бы “вторгаются” в гуманитарную сферу.

Имеет место и противоположный процесс, т.е. процесс вторжения гуманитарных методов анализа и прогноза в математические. Во-первых, построению любой математической модели предшествует гуманитарная фаза изучения явления, поскольку нужно “понимать” то, что поддается математическому моделированию. Во-вторых, понятия и представления, возникшие в ходе математического моделирования, результаты математического моделирования используются для прогноза явлений, процессов, систем более сложных, чем те, которые непосредственно доступны математическим средствам. Математическое моделирование в таком случае служит как бы фундаментом, над которым надстраивается гуманитарный анализ и прогноз сложного процесса.

Отмеченные аспекты взаимного влияния гуманитарных и математических методов анализа и прогноза явлений, процессов, систем являются на самом деле лишь грубой моделью этого взаимодействия. В настоящее время гуманитарные прогнозы многих “сложных” процессов (в экономике, медицине, социологии и т.д.) “поддерживаются” целыми системами математических моделей. С другой стороны, любая из стадий технологии математического моделирования (составление, идентификация, верификация, эксплуатация математической модели) предоставляет свои возможности для гуманитарного “понимания” моделируемого явления, процесса, системы и соответствующих прогнозов. Каждая область деятельности, которая требует прогноза развития некоторых процессов, характеризуется своим уровнем использования в ней технологии математического моделирования. Есть области, где прогноз дается только математическими моделями и гуманитарные методы почти не используются. Например, прогноз движения космических аппаратов дается только с помощью математических моделей. Есть области, где математическое

моделирование используется, но не является главным средством анализа прогноза. Примером такой области является медицина. В настоящее время область, где технология математического моделирования не используется совершенно, является, пожалуй, лишь искусство. Таким образом, граница между математическими и гуманитарными методами анализа и прогноза “размывается”, причем, в “обе стороны”. Этот процесс “размывания” границы между гуманитарным и математическим, между “жесткими” и “мягкими” средствами анализа и прогноза является процессом формирования технологий анализа и прогноза, объединяющих возможности математических и гуманитарных методов исследования. Такие технологии позволяют существенно расширить область реальных явлений, процессов, систем, которые поддаются адекватному прогнозу. Однако процесс формирования таких технологий пока является “медленным”. Если можно говорить о характерном времени этого процесса, то оно сейчас, по-видимому, соизмеримо со временем жизни поколения так, что в течение жизни отдельного человека этот процесс малозаметен.

### **3. Разработка инструментальных средств математической имитации**

Разработка инструментальных систем моделирования являлась результатом участия сотрудников отдела в *создании и эксплуатации моделей конкретных сложных процессов* (см. раздел, посвященный конкретным моделям). К настоящему времени в отделе разработаны две инструментальные системы моделирования. Инструментальная система моделирования MISS относится к процессно-ориентированным системам. В ее концепции имеются элементы сходства с концепцией СИМУЛЫ-67 и с SDL-концепцией проектирования и имитации систем связи. Предмет моделирования в MISS — это набор объектов, организованных в многоуровневую иерархию, а функционирование объектов трактуется как совокупность нескольких параллельно текущих процессов. Между любыми процессами могут существовать связи: посылая по ним сигналы, одни процессы могут изменять течение других. Эволюция каждого процесса представляется чередованием стадий. Моменты переключения между стадиями планируются по ходу имитации. Множество возможных переключений для всех стадий всех процессов фиксируется заранее, выбор конкретного переключения всякий раз определяется набором сигналов, полученных процессом на момент переключения. Главное отличие концепции MISS от известных состоит в более глубокой проработке механизма совместной эволюции стадий. Программирование в рамках MISS осуществляется на одном из языков MODULA-2, C++. Система MISS — продукт более чем двадцатилетней работы по созданию конкретных моделей сложных процессов. Один из вариантов упомянутой выше системы согласования производственных и эксплуатационных процессов, система анализа эффективности противоракетной обороны космического базирования, один из вариантов имитации функционирования системы государств были выполнены в среде MISS.

Вторая инструментальная система моделирования, разработанная в отделе, получила наименование ДИКСИ. Эта система реализована в виде объектной базы данных, с набором системных типов объектов, причем каждый системный тип также является объектом системы. Основным принципом задания динамики объектов в системе является объединение понятий объекта и процесса его изменения: каждый объект определяет процесс изменения в системном времени своего состояния и состояния иерархии своих подобъектов, посредством задания алгоритмов и временных параметров для объекта и иерархии подобъектов. В качестве базового механизма организации выполнения процесса принята иерархическая схема с квантованием шагов по времени. Программирование в рамках ДИКСИ осуществляется в любой системе программирования, поддерживающей стандарт DLL фирмы MICROSOFT.

### **4. Разработка теории декомпозиции математических объектов моделей**

Исследования проблемы декомпозиции математических моделей ведутся в отделе в течение последних двадцати лет. Эти исследования являются методологическим обеспечением основного направления деятельности отдела: разработки средств, обеспечивающих продвижение математического моделирования в новые области исследований и практической деятельности. Во-первых, необходимо было понять, при каких условиях сложную модель можно “эквивалентным” образом “представить” с помощью совокупности более “простых” моделей. Во-вторых, потребовался

понятийный аппарат для того, чтобы ориентироваться в вопросе о том, каковы границы применимости средств математического моделирования для анализа и прогноза реальных процессов, систем, явлений, каким образом математическое моделирование связано с *гуманитарными средствами анализа и прогноза* (см. раздел, посвященный методологическим аспектам имитационного моделирования). Одним из направлений в исследовании проблемы декомпозиции математических моделей является развитие геометрической теории декомпозиции.

В рамках этой теории модель погружается в класс математических объектов, в котором определено понятие об изоморфизме (эквивалентности) объектов. Среди объектов, изоморфных данному, отыскивается такой, который “представляется” с помощью семейства “более простых” объектов этого класса. При таком подходе свойства математических моделей допускать декомпозиции являются, очевидно, одними и теми же для всех моделей, изоморфных данной. Другими словами, декомпозиционные свойства математических моделей сохраняются при их изоморфизмах. Поэтому эти свойства выражаются в терминах, также сохраняющихся при изоморфных преобразованиях. Проблема декомпозиции, таким образом, родственна проблеме отыскания канонических форм некоторого класса математических объектов в рамках определенного для них понятия об изоморфизме.

В качестве инструментального средства для исследования проблемы декомпозиции математических моделей в том ее понимании, о котором говорилось выше, используется бурбаковский формализм. Именно математические модели трактуются как бурбаковские математические объекты, т.е. как множества, снабженные структурами в смысле Н. Бурбаки. Определяются (бурбаковские) понятия о подобъектах и фактор-объектах математического объекта относительно некоторым образом введенных (бурбаковских) морфизмов. (Бурбаковские подобъекты и фактор-объекты отличаются от их аналогов в теории категорий.) В основе геометрической теории декомпозиции лежат лишь два двойственных друг другу понятия: понятие о  $P$ -декомпозиции и понятие о  $F$ -декомпозиции математического объекта. Эти понятия, в сущности, есть бурбаковские понятия о начальной и финальной структурах некоторого семейства математических объектов. Упрощая и огрубляя ситуацию можно сказать, что  $P$ -декомпозицией ( $F$ -декомпозицией) математического объекта (модели) считается семейство его подобъектов (фактор-объектов), по которому он восстанавливается единственным образом (это означает, что существует не более одного объекта, обладающего заданной  $P$ -декомпозицией ( $F$ -декомпозицией)). Декомпозиционная структура математического объекта — это совокупность свойств множества его декомпозиций и взаимоотношений между различными декомпозициями. Можно понимать декомпозиционную структуру как структуру в бурбаковском смысле этого слова, которая индуцируется на множестве  $P$ -декомпозиций ( $F$ -декомпозиций) математического объекта его исходной структурой. Декомпозиционная структура “сохраняется”, когда объект подвергается изоморфизмам, поскольку при изоморфизмах подобъекты переходят в подобъекты, фактор-объекты — в фактор-объекты. Простейшим примером взаимоотношений между декомпозициями является отношение “более простая” на множестве  $P$ -декомпозиций математического объекта: если из семейства подобъектов, составляющих  $P$ -декомпозицию данного объекта, можно удалить некоторое количество подобъектов и оставшееся по-прежнему будет  $P$ -декомпозицией объекта (т.е. определять его единственным образом), то эта последняя  $P$ -декомпозиция называется “более простой”, чем исходная. Это отношение тесно связано со свойством компактности топологических пространств (см. ниже). Отношение “более простая” является отношением частичного порядка на множестве  $P$ -декомпозиций объекта. В большинстве случаев интерес представляют минимальные в смысле этого частичного порядка  $P$ -декомпозиции. Среди таковых наиболее важными является  $P$ -декомпозиции, у которых составляющие их подобъекты определены на классах по некоторому отношению эквивалентности, т.е. подмножества, на которых определены подобъекты, участвующие в декомпозиции, попарно не пересекаются, а их объединение есть все множество, на котором определен исходный объект. Наличие такой декомпозиции означает, что объект “распадается” на независимые в некотором смысле подобъекты, из которых он “составляется”, как из “кубиков”. Такая декомпозиция называется декомпозицией на дизъюнктивную сумму или  $SS$ -декомпозицией. Множество таких декомпозиций также снабжается структурой частичного порядка. Например, семейство транзитивных групп преобразований, которые генерируются исходной группой преобразований на классах эквивалентности по отношению эквивалентности,

которое индуцируется этой исходной группой преобразований на исходном множестве, есть максимальная СС-декомпозиция исходной группы преобразований на СС-простые (см. ниже) подобъекты. Двойственной к декомпозиции на дизъюнктивную сумму является декомпозиция объекта на декартово произведение семейства своих фактор-объектов. Такая декомпозиция называется DP-декомпозицией. Жорданово представление линейного оператора, действующего в конечномерном линейном векторном пространстве над полем комплексных чисел, является максимальной (относительно соответствующего частичного порядка) DP-декомпозицией этого оператора, а операторы, соответствующие жордановым клеткам, являются DP-простыми фактор-объектами (см. ниже). В теории декомпозиции определяются четыре типа “простоты” объектов: не имеющие нетривиальных подобъектов (для всякого объекта тривиальным подобъектом является он сам; аналогично для фактор-объектов) называются P-простыми, не имеющие нетривиальных фактор-объектов — F-простыми, не имеющие нетривиальных декомпозиций на дизъюнктивную сумму — СС-простыми, не имеющие нетривиальных декомпозиций на декартово произведение — DP-простыми. СС-простота и DP-простота являются примерами свойств декомпозиционной структуры математического объекта. Многочисленные примеры говорят о том, что важнейшие свойства многих математических объектов являются свойствами декомпозиционных структур этих объектов. Например, транзитивная группа преобразований является P-простым, а, значит, и СС-простым объектом. Прimitивная группа преобразований — это F-простой, а, значит, и DP-простой объект. Простая (абстрактная) группа — это F-простой объект (всякая абстрактная группа является СС-простым объектом), а простое поле — P-простой объект (всякое поле является одновременно СС-простым и F-простым объектом). Связное топологическое пространство и связный граф — это СС-простые объекты. Компактность топологического пространства — это свойство его декомпозиционной структуры, состоящее в том, что для всякой его P-декомпозиции, образованной открытыми множествами (для того чтобы семейство открытых множеств топологического пространства образовывало его P-декомпозицию, необходимо и достаточно, чтобы открытые множества семейства покрывали исходное топологическое пространство) существует более простая (см. выше пояснение отношения “более простая” между P-декомпозициями) конечная P-декомпозиция. Таким образом, компактность — это свойство декомпозиционной структуры топологического пространства. Нетривиализуемое расслоение дифференцируемого многообразия — это такая его P-декомпозиция, каждый элемент которой допускает нетривиальную декомпозицию на декартово произведение, в то время как исходное многообразие является DP-простым, т.е. не допускает нетривиальной декомпозиции на декартово произведение.

Ряд прикладных проблем сводится к изучению декомпозиционных структур соответствующих математических моделей. Например, наблюдаемость управляемой динамической системы (если наблюдаются некоторые функции фазовых переменных системы) есть свойство системы не иметь декомпозиций, в фактор-системе которой присутствуют все наблюдаемые функции. Наоборот, свойство управляемой системы иметь инвариантные функции есть свойство иметь декомпозиции определенного характера. (см. *Елкин В.И.* Редукция нелинейных управляемых систем. Декомпозиция и инвариантность по возмущениям. М.: Фазис, 2003). Примером прикладной проблемы, при исследовании которой изучались декомпозиционные структуры объектов, является построение образов изображений. Один из подходов к этой проблеме состоит в понимании “образа” изображения как того, что “сохраняется” в изображении, когда оно подвергается некоторой совокупности преобразований. Сопоставив с изображением тем или иным способом математический объект, можно пытаться строить образы изображения как совокупности свойств декомпозиционной структуры этого объекта, поскольку эти свойства “сохраняются”, когда объект подвергается изоморфизмам (см. выше).

Языковая среда теории декомпозиции позволяет высказать некоторые общие положения, методологического характера, являющиеся гуманитарной “надстройкой” (см. раздел, посвященный взаимодействию математических и гуманитарных методов анализа и прогноза) над строгой математической теорией. Ниже приводятся примеры такого сорта положений.

Если в наблюдаемой системе (процессе, явлении) видна “структура”, то эта система (процесс, явление) содержит в себе механизмы, сохраняющие (поддерживающие) эту “структуру”. Понимание природы этих механизмов является необходимым условием для понимания природы



данной системы (процесса, явления). Если возможно адекватное математическое моделирование этой системы (процесса, явления), то наблюдаемая “структура” системы есть декомпозиционная структура соответствующей математической модели. То, что называют “хаосом”, является отсутствием декомпозиционной структуры у наблюдаемой системы (процесса, явления). Чем сложнее “хаос”, тем он менее “устойчив”, а значит, менее вероятен. Тот факт, что чем больше порядок конечной (абстрактной) группы, тем “менее вероятно”, что она является F-простой (F-простота абстрактной группы означает, что ее операцию умножения нельзя описать “на агрегированном уровне”), связан с высказанным положением. Направление исследований, которое изучает возникновение (диссипативных) структур в естественных физических и физико-химических процессах, получило название “синергетика”.

В сложных управляемых системах декомпозиция реализуется посредством назначения части управлений в виде обратных связей (т.е. в виде функций измеряемых при функционировании системы характеристик) и ограничений на управления (чем меньше область допустимых управлений, тем, вообще говоря, больше множество возможных декомпозиций). В таких системах декомпозиция является средством реализации иерархии ценностей (предпочтений), достигаемых системой и приведения в соответствие сложности возникающих при этом управленческих задач имеющимся возможностям их решения, т.е. встроенной в систему информационной технологии (средств сбора, хранения, передачи, обработки информации). В очень сложных управляемых системах (например, биологических, экологических, социальных) на нижнем уровне этой иерархии находится задача удержания значений некоторой совокупности характеристик системы в достаточно узких пределах. Совокупность таких характеристик естественно назвать “внутренней средой системы”. Такая система существует до тех пор, пока она способна поддерживать свою внутреннюю среду и свою декомпозиционную структуру. Вне этой поддержки она либо разрушается, либо переходит в другую систему, способную какими-то другими обратными связями поддерживать другую среду и другую структуру. Совокупность обратных связей, поддерживающих внутреннюю среду системы и ее декомпозиционную структуру, называют “гомеостазом”. Элементы гомеостаза (самосохранения) присутствуют в социально-экономических сообществах, где они выражаются, в том числе, в форме обеспечения “стабильности” в сообществе. В частности, нравственные, этические нормы в поведении и общении людей являются механизмами гомеостаза, появившимися на определенной стадии развития (формировании структуры общественного производства) человеческого общества и обеспечившими ему потенциал для дальнейшего развития.

## **5. Изучение проблем декомпозиции, факторизации, редукции управляемых динамических систем**

Решение задач для многомерных нелинейных управляемых систем сопряжено с большими трудностями, которые носят как математический, так и эксплуатационный характер, ибо часто требуются неприемлемые затраты машинного времени. Поэтому актуальной является разработка методов редукции нелинейных систем, т.е. приведения систем к более простому виду, например к декомпозиции на системы меньшей размерности. Подходы к проблеме редукции могут быть разные, в частности использующие приближенные методы. Здесь рассматривается, вероятно, наиболее естественный и очевидный подход, который присутствует, по существу, в любой теории математических объектов, скажем, в теории линейных пространств, в теории групп и т.д. Редукция, о которой здесь идет речь, — это редукция, основанная на сопоставлении исходному объекту изоморфного объекта, фактор — объекта и подобъекта. Например, в теории линейных пространств это редукция к изоморфному линейному пространству, фактор — пространству и подпространству. Изложение элементов любой теории начинается с введения этих редуцированных объектов и определения основных их свойств по отношению к исходному объекту. Поэтому можно сказать, что теория редукции нелинейных управляемых систем (согласно данному подходу) представляет собой элементы общей теории таких систем. Оказывается, что данная теория имеет чисто дифференциально-геометрический и теоретико-групповой характер.

Формальное определение указанных редуцированных объектов, которое подходит для любой математической теории, можно сделать в рамках теории категорий или бурбаковского формализма (см. раздел, посвященный декомпозиции). На интуитивном уровне та или иная категория (например, категория линейных пространств или категория групп) представляет собой класс

объектов, причем каждый объект  $S$  является множеством  $M$  с заданной на нем некоторой структурой одного и того же рода. Эту структуру можно трактовать как совокупность связей определенного вида между элементами множества  $M$ . Кроме объектов в категорию входят морфизмы, описывающие взаимосвязи между объектами. Если объекты  $S_1, S_2$  заданы на множествах  $M_1, M_2$ , то морфизмом  $f$  объекта  $S_1$  в объект  $S_2$  является отображение  $M_1$  в  $M_2$ , сохраняющее структуру данного рода (т.е. сохраняющее соответствующие связи между элементами множеств). Например, в категории линейных пространств морфизмами являются линейные отображения, а в категории групп — гомоморфизмы.

Для нелинейных управляемых систем  $dy/dt = f(y, u)$  можно построить категорию следующим образом. Объектами этой категории, которую обозначим через  $NS$ , являются управляемые системы. Морфизмы определяются так. Рассмотрим наряду с некоторой системой  $S_1$ , описываемой соотношениями  $dy/dt = f(y, u)$ , управляемую систему  $S_2$ , описываемую соотношениями  $dx/dt = g(x, v)$ . Морфизмом системы  $S_1$  в систему  $S_2$  называется отображение  $f$  фазового пространства  $M$  системы  $S_1$  в фазовое пространство  $L$  системы  $S_2$ , переводящее решения (фазовые траектории) системы  $S_1$  в решения системы  $S_2$ .

Изоморфизм в той или иной категории — это морфизм  $f$ , представляющий собой взаимно однозначное отображение, причем обратное отображение также является морфизмом. Если для объектов  $S_1$  и  $S_2$  существует изоморфизм  $S_1$  в  $S_2$ , то объекты  $S_1$  и  $S_2$  называются изоморфными. Изоморфные объекты имеют одинаковые свойства в рамках данной категории. Например, в категории линейных пространств изоморфизмы — это линейные изоморфизмы.

Редукция управляемой системы к изоморфной или, как еще говорят, эквивалентной системе целесообразна, если последняя имеет более простой вид. Например, сложная нелинейная система может быть эквивалентна линейной системе. В этом случае нелинейность является "случайной чертой", которая стирается при переходе к эквивалентной системе. Существенные свойства управляемых систем, такие как управляемость, устойчивость, оптимальность решений, сохраняются при переходе к эквивалентной системе. Поэтому естественно попытаться решить ту или иную задачу управления для эквивалентной системы более простого вида, а затем "перенести" полученное решение на исходную систему с помощью изоморфизма.

Понятие подобъекта возникает в связи с желанием корректно построить сужение (ограничение) данного объекта  $S_1$ , заданного на множестве  $M$ , на подмножество  $N$  множества  $M$ . Вообще говоря, объект  $S_1$  сузить на произвольное множество нельзя. Объект  $S_2$ , заданный на подмножестве  $N$ , называется подобъектом, если каноническое вложение  $N$  в  $M$  является морфизмом. Например, в категории линейных пространств подобъекты — это линейные подпространства.

Потребность в сужении управляемой системы  $S_1$ , т.е. в переходе к подсистеме  $S_2$ , заданной на подмножестве  $N$  множества  $M$ , возникает, если из практических соображений на элементы множества  $M$  наложены некоторые ограничения (начальные условия, граничные условия и т.д.). В этом случае естественно попытаться сузить систему  $S_1$  на некоторое подмножество  $N$ , для которого эти ограничения удовлетворяются. Подсистема  $S_2$ , заданная на  $N$ , определяет часть решений исходной системы  $S_1$ , лежащих в  $N$  и, в частности, удовлетворяющих заданным ограничениям. Поэтому решение задачи управления, поставленной для системы  $S_1$ , может быть сведено к решению аналогичной задачи для подсистемы  $S_2$  с фазовым пространством меньшей размерности.

В то время как при сужении упрощение достигается за счет перехода на подмножество  $N$  множества  $M$ , при факторизации упрощение достигается за счет "сжатия" множества  $M$ , т.е. перехода на фактор-множество  $M/R$  по некоторому отношению эквивалентности  $R$ . При этом переходе точки, принадлежащие одному классу эквивалентности, "склеиваются" в одну точку фактор-множества  $M/R$ . Объект  $S_2$ , заданный на  $M/R$ , называется фактор-объектом объекта  $S_1$ , заданного на  $M$ , если каноническая проекция из  $M$  в  $M/R$  является морфизмом. Например, в категории линейных пространств фактор-объекты — это фактор-пространства.

Значение факторизации для редукции управляемых систем заключается прежде всего в том, что она порождает определенную декомпозицию исходной системы. Точнее, если у системы  $S_1$  существует фактор-система  $dz/dt = g(z, v)$ , заданная на некотором фактор-множестве  $M/R$ , то система  $S_1$  эквивалентна системе вида  $dz/dt = g(z, v)$ ,  $dx/dt = h(z, x, v)$ . Из вида этой системы следует, что любое решение  $z(t), x(t)$  системы может быть получено следующим образом.

Сначала нужно найти решение фактор-системы  $dz/dt = g(z, v)$  (соответствующее некоторому управлению  $v(t)$ ), а затем, после подстановки  $z(t)$  в  $dx/dt = h(z, x, v)$ , найти  $x(t)$ . На этом факте основана декомпозиция алгоритмов решения задач управления. Заметим также, что многие свойства управляемой системы (наблюдаемость, автономность и др.) определяются существованием фактор-систем специального вида.

Понятия изоморфного объекта, фактор-объекта и подобъекта могут применяться для редукции исходного объекта совместно и в различной последовательности. Конкретная последовательность переходов к редуцированной системе называется схемой редукции, а число переходов — глубиной редукции. При решении той или иной задачи управления схема и глубина редукции выбираются исходя из условий задачи.

Главным в проблеме редукции является построение математического аппарата для нахождения редуцированных объектов. Математический аппарат составляют понятия, которые имеют инвариантный характер относительно морфизмов. Для категории управляемых систем NS и ее различных подкатегорий эффективным инструментом исследования проблемы редукции являются ассоциированные дифференциально-геометрические и теоретико-групповые объекты: группа преобразований, алгебра Ли векторных полей, аффинное распределение, кораспределение, система Пфаффа и др. Объекты такого рода можно связать с каждой управляемой системой, причем структура этих объектов сохраняется при морфизмах категории управляемых систем. Отметим, например, следующие результаты. Подмножества, на которых могут существовать подсистемы, должны быть инвариантными многообразиями ассоциированной группы. Следовательно, для существования (нетривиальных) подсистем ассоциированная группа должна быть интранзитивной. С другой стороны для существования (нетривиальных) фактор-систем ассоциированная группа должна быть импримитивной.

## 6. Изучение сложных управляемых процессов с помощью оптимизационных и теоретико-игровых схем

Широкий спектр работ отдела связан с развитием теории игр с непротивоположными интересами, развитием теории принятия решений в условиях неопределенности и многокритериальности, приводящей в математическом плане к сложным негладким оптимизационным задачам минимаксного типа, а также к задачам с неявно заданными целевыми функциями и ограничениями. В рамках этого направления была разработана теория оптимального управления в иерархических системах, характеризующихся децентрализацией процессов управления, широким обменом информацией между подсистемами и гибко понимаемым принципом гарантированного результата с учетом всех гипотез о поведении подсистем. Разработанные модели и методы использовались при анализе экономических и экологических процессов, в различных задачах распределения ресурсов. Разработанные теоретико-игровые модели дают возможность формализовать понятие о стратегической стабильности в системе государств, позволяющее учитывать не только наличие ядерного оружия и последствия обмена ядерными ударами, но и экономические интересы государств в процессе их мирного развития. Одним из качественных результатов исследований является вывод о существовании ситуаций стратегической стабильности, в которых не происходит развития гонки вооружений.

Ниже перечисляются монографии, опубликованные сотрудниками отдела, в которых содержатся результаты охарактеризованных исследований.

1. Гусейнова А.С., Павловский Ю.Н., Устинов В.А. Опыт имитационного моделирования исторического процесса. М.: Наука, 1984. 157 с.
2. Ю.И. Бродский, В.Ю. Лебедев. Инструментальная система имитации MISS. М.: ВЦ АН СССР, 1991. 179 с.
3. Горелик В.А., Горелов М.А., Кононенко А.Ф. Анализ конфликтных ситуаций в системах управления. М.: Радио и связь, 1992. 288 с.
4. Иванюков В.Ю., Огарышев В.Ф., Павловский Ю.Н. Имитация конфликтов. М.: ВЦ РАН, 1993. 196 с.
5. Елкин В.И. Методы алгебры и геометрии, эквивалентности, факторизации, сужения управляемых процессов в теории управления. Аффинные распределения и аффинные системы. М.: МФТИ. 1996. 112 с.
6. Елкин В.И. Редукция нелинейных управляемых систем. Дифференциально-геометрический подход. М.: Наука, 1997. 320 с.

7. Павловский Ю.Н., Смирнова Т.Г. Проблема декомпозиции в математическом моделировании. М.: Фазис, 1998. 272 с.
8. Абдурахманов М.И., Баришполец В.А., Манилов В.А., Пирумов В.С. Основы национальной безопасности России. М.: Друза, 1998. 198 с.
9. Абдурахманов М.И., Баришполец В.А., Манилов В.А., Пирумов В.С. Геополитика и национальная безопасность. Словарь основных понятий и определений. М.: Друза, 1998. 157 с.
10. Elkin V.I. Reduction of nonlinear control systems. Kluwer Academic Publishes. Dordrecht–Boston–London, 1999. 248 pp.
11. Данилов Н.Ю., Павловский Ю.Н., Соколов В.И., Яковенко Г.Н. Геометрические методы в теории управления. М.: МФТИ, 1999. 156 с.
12. Павловский Ю.Н. Имитационные модели и системы. М.: Фазис, 2000. 131 с.
13. Ивашко Д.Г. Трехмерные аффинные управляемые системы. М.: ВЦ РАН, 2000. 130 с.
14. Савин Г.И. Системное моделирование сложных процессов. М.: Фазис, 2000. 275 с.
15. Абдурахманов М.И., Баришполец В.А., Манилов В.А. Национальная безопасность России. М.: ВЦ РАН, РАЕН. 2000. 203 с.
16. Елкин В.И. Редукция нелинейных управляемых систем. Декомпозиция и инвариантность по возмущениям. М.: Фазис, 2003. 207 с.
17. Павловский Ю.Н., Смирнова Т.Г. Шкалы родов структур, термы и соотношения, сохраняющиеся при изоморфизмах. М.: Фазис, 2003. 92 с.
18. Белотелов Н.В., Бродский Ю.И., Оленев Н.Н., Павловский Ю.Н., Тарасова Н.П. Проблема устойчивого развития: естественно-научный и гуманитарный анализ. М.: Фазис, 2004. 105 с.

## ОТДЕЛ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

*А.А. Белоліпецкый*

---

В 1989 г. для математического обеспечения решения ряда оборонных и народнохозяйственных задач, поставленных перед Министерством радиопромышленности СССР, в ВЦ АН СССР был создан отдел математического моделирования технических систем во главе с д.ф.-м.н. А.А. Белоліпецким. Это был один из четырех отделов, вошедших в отделение систем и решений, возглавляемое в тот момент членом-корреспондентом АН СССР П.С. Краснощековым. Главный вопрос, который стоял перед отделом и требовал аргументированного ответа, заключался в следующем. Способны или нет СССР и США создать глубокоэшелонированную систему противоракетной обороны. Для работы в отделе были приглашены сотрудники из других институтов, участвующие в разработке поражающих космических аппаратов, систем обнаружения наземных и космических объектов, пучкового и других видов оружия. Понадобилось три года, чтобы понять, что ни одно из современных государств не способно в ближайшие десятилетия справиться с тем множеством научных и технических задач, которые встают при решении этой проблемы. К такому выводу пришли многие научные коллективы, и это могло отчасти успокоить новое руководство новой страны, образовавшейся на обломках СССР, поскольку последнее не могло решить ни одной созидательной задачи, ограничиваясь лишь разрушительными. После 1992 г. стало ясно, что цели, поставленные ранее перед отделом, себя изжили. Часть сотрудников покинула стены ВЦ РАН, а оставшиеся посвятили себя решению теоретических вопросов, возникавших при постановке прежних проблем в рамках СОИ и новых, финансируемых различными фондами и центрами. Ограничимся описанием некоторых из них, исследованных в последнее десятилетие.

### **Математическое моделирование технологических процессов производства и контроля топливных мишеней**

С 1997 г. отдел участвовал в решении ряда задач математического моделирования технологических процессов производства лазерных мишеней. Это одно из направлений исследований в общей проблеме управляемого термоядерного синтеза. Управляемый термоядерный синтез с инерциальным удержанием, или ИТС — инерциальный термоядерный синтез, основан на очень быстром доведении сверхплотного ядерного топлива до термоядерных температур. Контейнер, содержащий ядерное топливо (как правило, это дейтерий-тритиевая смесь), называется мишенью. Исследования показывают, что абляционное сжатие сферически или цилиндрически симметричной топливной мишени для формирования центра горения является энергетически оптимальным процессом. Для этого мишень симметрично облучают со всех сторон лазерным излучением или иными видами излучения (рентгеновское, ионные и электронные пучки). При этом энергия излучения поглощается во внешней абляционной оболочке мишени, аблятор испаряется, ионизируется и разлетается со скоростью порядка 100 км/с, создавая реактивный импульс давления. Этот импульс сжимает неиспарившееся топливо, которое в центре мишени достигает необходимой плотности и температуры, что позволяет зажечь D-T термоядерную реакцию. Образующиеся в результате ее протоны с энергией 3,52 МэВ теряют ее во внутреннем слое холодного топлива и нагревают его. Образуется фронт термоядерного горения, который быстро распространяется в слое холодного топлива. Теоретические расчеты показывают, что для достижения условия breakeven (при котором энергия выхода в реакции термоядерного синтеза не меньше вложенной) необходимо существенное сжатие и нагрев вещества мишени до температур 10 КэВ. Для этого можно использовать одну из трех схем облучения топливной мишени. Это прямое облучение, прямое зажигание, или быстрый поджиг, и не прямое рентгеновское облучение. Хотя структура мишени и ее физические характеристики зависят от схемы облучения, однако неизменной остается одна черта — мишень должна представлять

собой сферическую оболочку с твердым слоем D-T топлива внутри нее. Эта нехитрая, на первый взгляд, конструкция оказалась достаточно сложной при ее технической реализации. Первая проблема состоит в доставке топлива внутрь многослойной полистироловой оболочки мишени без нарушения целостности последней. Одно из ее решений заключается в том, что оболочка помещается в контейнер с D-T газообразной смесью, находящейся под давлением. В результате газ проникает через стенку мишени, постепенно заполняя ее, давление его внутри мишени повышается, вместе с этим следует повышать и внешнее давление, но так, чтобы не разрушить оболочку. Поскольку в оптимальном по быстродействию режиме разность внешнего и внутреннего давлений не должна превышать критического значения, при котором может разрушиться оболочка, необходимо с высокой степенью точности определять давление газа внутри мишени, измерить которое невозможно. При этом внутреннее давление может достигать от 300 до 1000 атм. Было необходимо разработать адекватную математическую модель заполнения газопроницаемых оболочек до высоких давлений [1–3], когда состояние газа описывается уравнением Ван-дер Ваальса. Теоретическим ядром такой модели является постановка и решение нелинейной краевой задачи для сингулярно возмущенной системы уравнений параболического типа. Решение было получено в виде асимптотического ряда по степеням малого параметра. Результаты модельных расчетов были в дальнейшем использованы при конструировании системы заполнения оболочек в лаборатории термоядерных мишеней нейтронно-физического отдела ФИАН им. П.Н. Лебедева. После заполнения газом мишень помещается в криостат, где охлаждается до температур фазовых переходов, в результате которых газ оседает на внутренней стенке мишени в виде твердого слоя. Поскольку к однородности, шероховатости и разнотолщинности этого слоя предъявляются высокие технологические требования, процесс охлаждения должен проходить так, чтобы эти требования выполнялись. Для этого в отделе был предложен ряд моделей остывания и кристаллизации газа на стенке мишени [4–6]. Расчеты на них позволили определить конструктивные параметры криостатов, разработанных в вышеназванной лаборатории ФИАН. Контроль качества, или характеристика, мишени представляет еще один важный этап в технологической цепи ее производства. Для этого мишень просвечивают излучением, коэффициенты преломления и поглощения которого зависят или не зависят от оптической плотности среды, и по теневым изображениям вычисляют нужные физические и геометрические параметры оболочки и топлива. В отделе разрабатывались два подхода к решению этой задачи. Первый базировался на методах прямолинейной томографии. Предполагалось наличие источника рентгеновского излучения и обработка большого массива теневых картинок. Он не получил дальнейшего развития из-за дороговизны рентгеновского источника и требуемой системы сканирования, но главным образом из-за неприемлемого времени обработки изображений. Второй подход, названный пороговым алгоритмом, ограничивается анализом небольшого числа изображений мишени при облучении ее длинноволновым источником излучения [7, 8]. Он основан на сравнении распределения освещенности различных участков теневой картинки с неким эталонным. Если хотя бы для одного участка освещенность выходит за теоретически вычисленные пороги, мишень бракуется. На предварительном этапе необходимо вычислить эти пороги, то есть решить большую серию задач математического программирования. В реальном времени требуется лишь проводить сравнение полученного изображения с эталонным, что позволяет ускорить процесс характеристики по сравнению с томографическим методом на три порядка. Ценою за это ускорение является потеря информации об объемной структуре топливного слоя, однако существенный выигрыш во времени компенсирует этот недостаток. В последнее время задачи контроля качества топливного слоя включают в себя и знание пространственного распределения концентрации D-T смеси, степень аморфности ее и другие вопросы. Один из подходов к этому кругу проблем видится в исследовании механизмов возникновения диссипативных структур в физически однородных средах.

#### **Асимптотические методы исследования эволюции диссипативных структур в уравнениях реакции-диффузии и длинных волн**

С середины 80-х гг. А.М. Тер-Крикоровым и А.А. Белолипецким изучалось поведение решений полулинейных уравнений параболического типа в окрестности точек простых бифуркаций. Интерес к этим задачам возник под влиянием исследований И. Пригожина и его брюссельской

школы по неравновесной термодинамике, синергетике, к ним же примыкали уравнения реакции-диффузии из химической кинетики, математической биологии и др. Пространственно однородные решения этих уравнений теряли устойчивость, и возникали неустойчивые пространственно неоднородные решения, или диссипативные структуры. Находились условия, при выполнении которых стационарное и однородное по пространству решение теряет устойчивость. Строились решения, реализующие переход от такого неустойчивого решения к некоторому устойчивому, стационарному, но неоднородному по пространству решению. Такие решения перехода были названы фундаментальными. Оказалось, что фундаментальное решение играет роль аттрактора. Если начальные возмущения расположены в определенной области, то решение задачи Коши асимптотически ведет себя как некоторое фундаментальное решение. Основной аппарат был разработан сначала для абстрактного нелинейного параболического уравнения [9], а затем применен к системе уравнений реакции-диффузии [10–12]. Были найдены условия, при выполнении которых нахождение подобных решений для уравнений реакции-диффузии сводится к соответствующей проблеме для абстрактного параболического уравнения [13]. В 2003 г. была выполнена итоговая работа по исследованию асимптотических решений типа длинных волн для одного класса граничных задач математической физики [14].

### **Исследование внутренних волн в стратифицированных средах**

Исследование внутренних волн в стратифицированных средах представляет значительный научный и практический интерес, поскольку естественными примерами подобных сред являются мировой океан и земная атмосфера. В работах [15–18] в линейной постановке исследовались стационарные задачи обтекания в поле силы тяжести стратифицированным потоком идеальной несжимаемой жидкости различных препятствий, находящихся как внутри жидкости, так и на горизонтальном дне. Рассматривался общий закон стратификации, когда жидкость состоит из слоев, внутри которых плотность изменяется непрерывно и терпит разрывы первого рода на границах слоев. Исследовалось асимптотическое поведение внутренних волн на больших расстояниях от источников возмущений.

Исследования [18–23] были посвящены нестационарным проблемам внутренних волн в стратифицированных средах. За счет специфического выбора эйлерово-лагранжевых переменных удалось свести общую гидродинамическую задачу к смешанной задаче для системы двух нелинейных уравнений с граничными условиями на известных границах. Известно, что в потенциальном поле в стратифицированной среде сохраняется только проекция вектора вихря скорости на нормаль к поверхности постоянной плотности (для несжимаемой жидкости) или постоянной энтропии (для идеального газа). Эта проекция называется потенциальным вихрем. Была решена задача о внутренних волнах, возникающих в первоначально покоящейся среде от возникшего в начальный момент потенциального вихря. В чисто линейной постановке вертикальных колебаний не возникает, но в предположении, что квадрат потенциального вихря и вертикальные смещения частиц имеют один порядок, потенциальный вихрь вызывает вертикальные колебания с возрастающей амплитудой. Было показано, что наличие распределенных источников на оси вихря усиливает интенсивность потенциального вихря. Этот факт находится в соответствии с наблюдаемыми в природе явлениями. Зарождающиеся интенсивные атмосферные вихри сопровождаются интенсивными осадками в виде дождя, града и снега.

Цикл исследований [24–31] связан с построением фундаментального решения для уравнения внутренних волн с коэффициентами, терпящими разрывы на некоторых горизонтальных плоскостях. Интерес к подобной проблеме связан со структурой реальной атмосферы. Известно, что есть сравнительно узкие атмосферные слои, в которых частота Брента–Вяйсяля, являющаяся важной физической константой, резко возрастает, оставаясь вне этих слоев практически постоянной. Но именно эти слои играют роль волноводов, и поэтому исследование колебаний в этих слоях, возникающих от точечного источника, представляют практический интерес. Изучались математические модели двухслойной и трехслойной атмосферы. Решения были представлены в виде быстро сходящихся рядов. Показано, что только конечное число членов ряда дает существенный вклад в асимптотическое поведение решений на больших временах.

### **Моделирование турбулентного потока сжимаемого газа с ударными волнами**

Моделирование турбулентного потока сжимаемого газа с ударными волнами тесно связано с задачами о воздействии ударной волны на газодинамические флуктуации. В последние годы увеличивается число публикаций, посвященных исследованию взаимодействия ударных волн с турбулентностью (см., например, [32–34]). Однако в этой области остается много нерешенных вопросов в связи с тем, что сама сжимаемая турбулентность является недостаточно изученной. Моделирование основано на синтезе разностных схем повышенной точности для уравнений Эйлера и статистических методов [35–39]. Генерация турбулентных пульсаций производится с помощью прямого расчета стохастических полей параметров газа с различными начальными условиями, характеризующимися случайными амплитудами параметров. Проводится усреднение по расчетам с различными начальными пакетами параметров со случайными амплитудами. Разработана пространственная модель сжимаемой турбулентности [39], которая является обобщением подхода, принятого в [35–38], на двумерный случай. Для газодинамических расчетов используется оригинальный двумерный аналог разностной схемы на минимальном шаблоне второго порядка точности. Проведены численные исследования взаимодействия однородной изотропной турбулентности с первоначально плоской ударной волной. Для различных типов турбулентности получены новые данные о поведении коэффициентов усиления ударной волной флуктуаций термодинамических параметров газа, завихренности, а также кинетической энергии турбулентных пульсаций. Исследованы коэффициенты корреляции. Проведено численное исследование зависимости статистических характеристик различных типов турбулентности от коэффициента корреляции флуктуаций плотности и продольной скорости газа при взаимодействии с ударной волной. Для флуктуаций плотности получены корреляционные и спектральные функции. Исследования проводились для чисел Маха ударной волны  $M \leq 2$  и параметра возмущения, лежащего в пределах 0,1–0,3. Результаты численных расчетов согласуются с экспериментальными данными по коэффициенту усиления пульсаций плотности и виду корреляционной функции [40]. Исследовалось влияние флуктуаций параметров газа на затухание N-волны [38]. Под N-волной понимается квазиустойчивая волновая структура, состоящая из двух ударных волн и волны разрежения. Получены новые количественные данные о затухании интенсивности N-волны после прохождения области турбулентных пульсаций.

Проведены численные расчеты взаимодействия первоначально плоской ударной волны с вихревыми структурами для режимов взаимодействия, при которых происходит разрушение отдельных вихрей [41]. Такая структурная перестройка поля турбулентных пульсаций может являться причиной регистрируемого в экспериментах существенного изменения линейного масштаба турбулентности при переходе через фронт ударной волны.

На основе разработанной модели было показано, что турбулентное возмущение в сверхзвуковом потоке может существенно воздействовать на аэродинамические свойства тел, а также породить серию акустических волн вблизи тела. Таким образом, предложенная модель сжимаемой турбулентности может быть использована для изучения воздействия турбулентности на режимы сверхзвукового обтекания тел.

### **Моделирование газодинамических эффектов при воздействии СВЧ-энергии на сверхзвуковое обтекание тел**

Эти работы ведутся совместно с Институтом высоких температур РАН с 2001г. Идея управления сверх- и гиперзвуковыми аппаратами посредством вклада энергии в набегающий поток привлекает внимание исследователей уже на протяжении полутора десятков лет и рассматривается в настоящее время как весьма перспективная [42–48]. Энергия вкладывается в заданную область потока, например, электрическим разрядом, приводя затем к изменению аэродинамических характеристик тела.

Систематическое исследование воздействия на режим сверхзвукового обтекания затупленного тела тонкого разреженного канала проводится в работах [42, 43]. Выявлено существенное воздействие, оказываемое модифицированным потоком на лобовое сопротивление затупленных тел. К этой проблематике тесно примыкают работы по исследованию взаимодействия ударной



волны с бесконечной высокотемпературной нитью (см., например, [45]). К настоящему времени количество экспериментальных и теоретических работ в данной области непрерывно растет.

Моделируются газодинамические последствия наличия в сверхзвуковом потоке, натекающем на тело, протяженного по пространству источника энергии в виде канала с пониженной плотностью и постоянным давлением, равным давлению в невозмущенном потоке. Такой канал может быть образован, например, в результате нагрева газа с помощью инъекции в поток СВЧ-энергии (СВЧ-разряда). Результаты расчетов согласуются с экспериментальными данными исследования взаимодействия СВЧ-разряда со сверхзвуковыми моделями по динамике отхода головной ударной волны и эволюции давления в точке торможения [46–50]. Используются оригинальные консервативные разностные схемы второго порядка точности, включая различные модификации схемы на минимальном шаблоне [51]. Построение методов основано на идее повышения порядка разностных схем [52]. Схемы дополнены методами выделения ударных волн и контактных разрывов, а также недиссипативными методиками постановки граничных условий. Рассматривалось обтекание затупленных и заостренных тел. Исследовалась также ситуация, когда канал постоянно присутствует в потоке, т.е. имеет бесконечную длину. Получены новые данные об изменении структуры течения, отхода головной ударной волны, а также сил сопротивления поверхностей тел в ситуациях отошедшей и присоединенной головной ударной волны. Показана возможность существенного уменьшения сил сопротивления поверхностей тел за счет образования вихря в области между головной ударной волной и телом. При наличии в потоке бесконечного тонкого разреженного канала рассматривается установление стационарных режимов обтекания тел и исследуется картина течения в стационарных режимах.

Полученные эффекты могут найти применение для изменения характеристик обтекаемого тела в целях совершенствования процесса управления летательными аппаратами.

### **Аппарат обобщенных характеристик для расчета разрывных решений уравнений газовой динамики**

В секторе, руководимом доктором физ.-матем. наук В.Г. Грудницким, был проведен анализ численных методов решения гиперболических уравнений схемами высокого порядка аппроксимации, полученными алгоритмом Ричардсона и аналогичными приемами [53]. Было показано, что на больших временах эти подходы не повышают точности решения, то есть фактически не являются схемами высокого порядка. Возможно эта работа, а также доклад, сделанный на первой конференции Бабенко в Бендерах, наряду с другими факторами способствовали тому, что бурный интерес к этим методам быстро угас. Разработаны и применяются в большом количестве прикладные схемы второго порядка аппроксимации на минимальном шаблоне [54]. Эти схемы, в отличие от большинства схем данного класса, не требуют применения сложных процедур сглаживания и значительных перестроений шаблона вблизи границ. Предложен и интенсивно разрабатывается аппарат обобщенных характеристик [55]. С его помощью впервые были получены достаточные условия устойчивости для расчета разрывных решений законов сохранения газовой динамики (доказана устойчивость расчета нелинейных разрывных решений). Установлена прямая связь между устойчивостью и монотонностью численного решения.

Из большого числа практических задач, решение которых было получено за время работы в ВЦ, можно упомянуть следующие. Была предложена принципиальная схема, проведены все необходимые расчеты, курировались создание и успешные испытания устройства, обеспечивающего вывод мощных электронных пучков из глубокого вакуума в атмосферные условия [56]. Идеология такого устройства использовалась позднее в прикладных институтах, занимавшихся подобными проблемами. Отдельные элементы устройства отмечались премиями и медалями на всесоюзных выставках. Проводились обширные численные исследования прохождения лазерных и электронных импульсов через атмосферу [57]. Особое внимание было уделено режимам многократной самофокусировки, в которых удалось обосновать качественное изменение режимов прохождения импульсов и дать разумное объяснение ряду аномальных эффектов. Были проведены численные исследования взаимодействия ударных волн с телами различной формы. В частности, установлен факт затухания колебаний при набегании ударных волн на плоскую и цилиндрическую выемки. Установлены аппроксимирующие зависимости величины декремента затухания колебаний от определяющих параметров течения, хорошо совпадающие с экспериментальными результатами. Был выполнен ряд работ по взаимодействию ударных волн

с затупленными телами, как покоящимися, так и движущимися со сверхзвуковой скоростью. Исследовались колебания парогазовой полости в воде. Впервые определен декремент затухания колебаний. Исследовалось прохождение ударных волн через термики различной интенсивности.

### **Методы решения обратных задач математической физики, возникающих при восстановлении эмпирической информации о свойствах, структуре и эволюции астрофизических объектов**

Методы и программы предназначаются для:

— устранения априорно неизвестных атмосферных и абберационных искажений в (не)когерентных изображениях (не)стационарных астрономических объектов естественного и искусственного происхождения;

— автоматического адаптивного обнаружения и распознавания как внегалактических объектов, так и объектов ближнего космоса;

— статистически оптимального (в рамках адаптивного байесовского подхода) оценивания пространственных, временных, спектральных и поляризационных характеристик астрономических объектов на основе алгоритмической обработки восстанавливаемых изображений.

Кроме того, эти методы приложимы в сфере офтальмологии, технической диагностики, оптической и электронной микроскопии.

Актуальность задач подтверждается их принадлежностью к списку проблем, приведенных в подпрограмме “Распознавание образов и обработка изображений”, включенной Министерством науки и технологий Российской Федерации в государственную программу “Перспективные информационные технологии”.

В практическом плане методы позволяют:

— наделять локационную систему большей автономностью (без ущерба ее эффективности) вследствие ненужности дополнительного калибровочного измерения мгновенных или средних передаточных характеристик канала атмосфера-телескоп по сигналу от яркой эталонной — естественной или лазерной — звезды);

— делают локационную систему более экономичной, поскольку отпадает необходимость дооснащать телескоп такими уникальными и дорогостоящими вспомогательными устройствами, как измеритель волнового фронта сигнала от звезды, деформируемое (адаптивное) зеркало, лазерный передатчик и электронный блок управления.

### **Разработка эффективных топологических алгоритмов построения изоконтуров**

Усложнение математического эксперимента с учетом возрастающих возможностей вычислительной техники предъявляет новые нестандартные требования к представлению результатов. Например, для визуализации картины *скалярного поля* — функции, заданной в  $\mathbf{R}^3$ , перспективным представляется подход, связанный с построением графа Рибо или графа контуров, позволяющих трассировать топологическую эволюцию поверхностей уровня. Стандартные алгоритмы визуализации изображений и машинной графики плохо приспособлены для построения графа контуров, поскольку не учитывают или даже уничтожают топологическую информацию, да и весьма трудоемки.

Впервые быстрый алгоритм вычисления графа контуров кусочно-линейной функции, заданной на односвязной области в  $\mathbf{R}^3$ , был построен в [58]. В настоящее время его модификации широко используются в Ливерморской национальной лаборатории для построения графов контуров в  $\mathbf{R}^3$  и представления более сложных геометрических объектов.

### **Литература**

1. Белолипецкий А.А. Нелинейная математическая модель заполнения тонкостенных оболочек газом // Вестник Московского университета. Серия 15. Вычислительная математика и кибернетика. 2000. № 2. С. 7–10.
2. Aleksandrova I.V., Belolipetskiy A.A., Koresheva E.R. et al. An efficient method for filling targets with a highly-pressurized gas fuel // J. of the Moscow Physical Society. № 9. P. 325–335.
3. Aleksandrova I.V., Belolipetskiy A.A., Koresheva E.R. et al. Mathematical models for filling polymer shells with a real gas fuel. // J. Laser and Particle Beams. V. 17, № 4. P. 701–712.

4. Aleksandrova I.V., Belolipetskiy A.A., Koresheva E.R. et al. Free-standing target technologies for ICF // J. Fusion Technology. V. 37, № 1. P. 166–172.
5. Белолипецкий А.А. Математическая модель остывания тонкостенной оболочки при быстром конвективном перемешивании газа внутри нее // Вестник Московского университета. Серия 15. Вычислительная математика и кибернетика. 2001. № 1. С. 14–17.
6. Белолипецкий А.А. Математическая модель вымерзания газа на внутренней стенке лазерной мишени // Серия 15. Вычислительная математика и кибернетика. 2002. С. 23–28.
7. Aleksandrova I.V., Belolipetskiy A.A., Koresheva E.R. et al. Progress in the development of tomographic information-processing methods for application to ICF target characterization // J. Fusion Technology. V. 38, № 2. P. 190–205.
8. Александрова И.В., Белолипецкий А.А., Писарницкая Е.А. Пороговый метод характеристики лазерных мишеней в проблеме лазерного термоядерного синтеза // М.: ВЦ РАН, 2003. С. 1–75.
9. Белолипецкий А.А., Тер-Крикоров А.М. Построение фундаментальных решений абстрактного нелинейного параболического уравнения в окрестности точки бифуркации // Матем. сб. 1985. Т. 128. Вып. 3. С. 306–320.
10. Белолипецкий А.А., Тер-Крикоров А.М. Об одном классе решений абстрактного нелинейного параболического уравнения вблизи точки бифуркации // Докл. АН СССР. 1984. Т. 279, № 4. С. 777–780.
11. Белолипецкий А.А., Тер-Крикоров А.М. О фундаментальных решениях нелинейного уравнения теплопроводности // Ж. вычисл. матем. и матем. физики. 1984. Т. 24, № 6. С. 850–863.
12. Белолипецкий А.А., Стронгина Н.Р., Тер-Крикоров А.М. Некоторые вопросы эволюции диссипативных структур с точки зрения теории бифуркаций // Математическое моделирование. Методы описания и исследования сложных систем. / Научн. сб. под редакцией А.А. Петрова и А.А. Самарского. М.: Наука, 1989. С. 25–54.
13. Белолипецкий А.А., Тер-Крикоров А.М. Бифуркации в уравнениях реакции-диффузии и связанные с ними диссипативные структуры // Сборник трудов факультета ВМК МГУ им. Ломоносова. Численные методы и вычислительный эксперимент. Диалог. М.: Изд-во МГУ, 1998. С. 15–30.
14. Белолипецкий А.А., Тер-Крикоров А.М. Асимптотические решения типа длинных волн для одного класса граничных задач математической физики // Нелинейный анализ и нелинейные дифференциальные уравнения. / Научн. сб. под редакцией В.А. Треногина и А.Ф. Филиппова. М.: Физматлит, 2003. С. 145–196.
15. Тер-Крикоров А.М., Бежанов К.А., Онуфриев А.Т. Пространственная задача обтекания неровности дна потоком стратифицированной жидкости конечной глубины // Известия АН СССР. 1990. № 3. С. 101–111.
16. Тер-Крикоров А.М., Бежанов К. Пространственная задача обтекания источника потоком многослойной жидкости // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 1993. Т. 29. № 6. С. 771–779.
17. Тер-Крикоров А.М. Исследование задачи обтекания тела плоским стратифицированным потоком // ПММ. 1993. Т. 57. Вып. 3. С. 41–49.
18. Тер-Крикоров А.М. О силах, действующих на препятствие в стратифицированном потоке // ПММ. 1993. Т. 57. выпуск 1. С. 58–64.
19. Тер-Крикоров А.М. Эволюция вихрей и внутренних волн в стратифицированной жидкости // ДАН СССР. 1994. Т. 338. № 1. С. 54–56.
20. Тер-Крикоров А.М. Вихри и внутренние волны в стратифицированной жидкости // ПММ. 1995. Т. 59. Вып. 4. С. 599–606.
21. Тер-Крикоров А.М., Гордейчик Б.Н. О равномерных аппроксимациях фундаментального решения уравнения внутренних волн // ПММ. 1996. Т. 60. Вып. 3. С. 443–450.
22. Тер-Крикоров А.М. Фундаментальное решение уравнения внутренних волн для среды с разрывной частотой Брента-Вяйсяля // ПММ. 1997. Т. 61. Вып. 4. С. 621–677.
23. Тер-Крикоров А.М., Секоян А.Х. Внутренние волны от потенциальных вихрей // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 1998. № 1. С. 118–123.
24. Тер-Крикоров А.М. Источник в стратифицированной среде с разрывной частотой Брента-Вяйсяля // Доклады РАН. 1998. Т. 358. № 1.
25. Тер-Крикоров А.М., Бежанов К. Метод исчезающей вязкости Озеена в теории стратифицированных течений несжимаемой жидкости // Phystech Journal. 1997. V. 3, № 2. P. 85–95.
26. Тер-Крикоров А.М., Оганесян Х.В. Неустойчивость стационарных течений, генерируемых вихревой нитью в стратифицированном газе // ПММ. 1999. Т. 63. Вып. 3. С. 467–469.
27. Тер-Крикоров А.М., Оганесян Х.В. Нелинейная неустойчивость стационарных течений, генерируемых вихревой нитью в стратифицированном газе // ПММ. 2000. Т. 64. Вып. 2. С. 349–351.
28. Тер-Крикоров А.М. Об уравнении осесимметрических колебаний плавучести в идеальной жидкости // ПММ. 2000. Т. 64. Вып. 4. С. 555–559.
29. Тер-Крикоров А.М. Возмущения от источника в трехслойной атмосфере // ПММ. 2002. Т. 66. Вып. 1. С. 62–68.

30. Тер-Крикоров А.М. Возмущения от источника в двухслойной атмосфере, ограниченной горизонтальной земной поверхностью // ПММ. 2003. Т. 67. Вып. 1. С. 75–80.
31. Тер-Крикоров А.М. Внутренние волны в среднем слое трехслойной атмосферы от расположенных в нижнем слое источников // ПММ. 2004. Т. 68. Вып. 3. С. 433–436.
32. Manesh K., Lele K.S. The influence of entropy fluctuations on the interaction of turbulence with a shock wave // J. Fluid Mech. 1997. V. 334. P. 353–379.
33. Andreopoulos Y., Agui T.H., Briassulis G. Shock wave — turbulence interactions // Annual Rev. of Fluid Mech. 2000. V. 32. P. 309–345.
34. Jamme S, J.-B. Cazalbou J.-B., F. Torres F., Chassaing P. Direct Numerical Simulation of the Interaction between a Shock Wave and Various Types of Isotropic Turbulence // Flow, Turbulence and Combustion. 2002. V. 68. P. 227–268.
35. Азарова О.А., Яницкий В.Е. Численное исследование статистических характеристик пульсаций плотности в потоке с ударной волной // Журн. вычисл. матем. и матем. физ. 1998. Т. 38, № 10. С. 1751–1757.
36. Азарова О.А., Яницкий В.Е. Флуктуации в потоке газа с ударной волной // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 2000. Т. 40, № 11. С. 1753–1760.
37. Азарова О.А., Яницкий В.Е. Численное моделирование прохождения N-волны в потоке газа с флуктуациями параметров // ЖВМ и МФ. 2002. Т. 42, № 1. С. 95–100.
38. Azarova O.A., Yanitskii V.E. Density Pulsations in a Shock Wave Flow // Proc. of the 21st International Symposium on Rarefied Gas Dynamics, 26-31 July, 1998, Marseille, France: Cepadues-Editions. 1999. С. 53–60.
39. Азарова О.А. Численное моделирование взаимодействия турбулентности с ударной волной в потоке сжимаемого газа // ЖВМ и МФ. 2004. Т. 44, № 3. С. 543–552.
40. Азарова О.А., Братинкова Е.А., Штеменко Л.С., Шугаев Ф.В., Яницкий В.Е. Влияние ударной волны на пульсации плотности потока // Вестн. МГУ. Сер. 3. Физ., астроном. 1997. № 6. С. 43–46.
41. Azarova O.A., Shtemenko L.S., Shugaev F.V. Numerical Modeling of Shock Propagation through a Turbulent Flow // Computational Fluid Dynamics Journal / Dept. of Mechanical and Systems Engineering, Tokyo Noko University, Tokyo, Japan. 2003. V. 12, № 2. P. 41–45.
42. Артемьев В.И., Бергельсон В.И., Немчинов И.В. и др. Изменение режима сверхзвукового обтекания препятствия при возникновении перед ним тонкого разреженного канала // МЖГ. 1989. № 5. С. 146–151.
43. Войнович П.А., Жмакин А.И., Фурсенко А.А. Моделирование взаимодействия ударных волн в газах с пространственными неоднородностями параметров // ЖТФ. 1988. Т. 58. Вып. 7. С. 1259–1267.
44. Levin V.A., Afonina N.E. et al. Vehicle Streamlining Control via Outside Energy Supply and Interaction with Atmospheric Inhomogeneities // MSU Pub. № 24–97. Moscow. 1997. 22 p.
45. Bityurin V.A., Klimov A.I., et al. On Interaction of Longitudinal Pulse Discharge with Bow Shock // Workshop “Perspectives of MHD and Plasma Technologies in Aerospace Applications”, IVTAN. Moscow. 1999. P. 114–119.
46. Kolesnichenko Yu.F., Brovkin V.G., Azarova O.A., Grudnitsky V.G. et al. Microwave Energy Release Regimes for Drag Reduction in Supersonic Flows // 40th AIAA Aerospace Meeting & Exhibit, Paper AIAA-2002-0353. P. 1–13.
47. Kolesnichenko Yu.F., Brovkin V.G., Azarova O.A., Grudnitsky V.G. et al. MW Energy Deposition for Aerodynamic Application // 41st AIAA Aerospace Meeting & Exhibit, Paper AIAA-2003-361. P. 1–11.
48. Kolesnichenko Yu.F., Brovkin V.G., Azarova O.A., et al. Basics in Beamed MW Energy Deposition for Flow/Flight Control // 42nd AIAA Aerospace Meeting & Exhibit, Paper AIAA-2004-0669. P. 1–14.
49. Kolesnichenko Yu.F., Brovkin V.G. et al. Microwave Discharge Parameters in Supersonic Flow // 40th AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, Reno, NV, 14–17 January, 2002. Paper AIAA-2002-0356. P. 1–15.
50. Kolesnichenko Yu.F., Brovkin V.G., Khmara D. et al. “Fine Structure of Microwave Discharge: Evolution Scenario” // 41st AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, Reno, NV, 6-9 January, 2003. Paper AIAA-2003-0362. P. 1–11.
51. Азарова О.А. Разностная схема с выделением разрывов для расчета взрывных течений в жидкостях и газах // Акустика неоднородных сред. Динамика сплошной среды. Вып. 105, Новосибирск, 1992. С. 8–14.
52. Грудницкий В.Г., Прохорчук Ю.А. Один прием построения разностных схем с произвольным порядком аппроксимации дифференциальных уравнений в частных производных // Докл. АН СССР. 1977. Т. 234, № 6. С. 1249–1252.
53. Грудницкий В.Г. О поведении численного решения краевых задач для эволюционных уравнений в больших областях // Доклады Академии наук. 1980. Т. 252, № 5.
54. Грудницкий В.Г. Достаточное условие устойчивости при явном построении разрывных решений системы уравнений Эйлера. // Доклады Академии наук. 1998. Т. 362. № 3.

55. Грудницкий В.Г. Один прием построения разностных схем с произвольным порядком аппроксимации дифференциальных уравнений в частных производных // Доклады Академии наук. 1977. Т. 234, № 6.
56. Грудницкий В.Г. Принципиальная схема и численное моделирование течений в газодинамическом окне с большим перепадом давлений // ЖВМ и МФ. 1991. Т. 31, № 4.
57. Грудницкий В.Г. Численное исследование взаимодействия лазерных импульсов с газовой средой // Ж. теплофизика высоких температур. 1994. Т. 32, № 4.
58. Tarasov S., Vyalyi M. Construction of contour trees in 3D in  $O(n \log n)$  steps. Proc. 14th Annu. ACM Symp. on Comput. Geometry, 1998.

## ОТДЕЛ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

*А.А. Петров*

---

История отдела восходит к основанию Вычислительного центра Академии наук СССР. В 1956 г. в лабораторию “Теоретические исследования”, которой руководил Александр Александрович Абрамов, пришел старший научный сотрудник, доктор физ.-матем. наук Никита Николаевич Моисеев. В 1957 г. Н.Н. Моисеев возглавил новую лабораторию — “Общая



*А.А. Дородницын и Н.Н. Моисеев*

механика и гидродинамика”. Она и стала прародительницей отдела “Математическое моделирование экономических систем”.

Никита Николаевич одновременно был деканом аэромеханического факультета, созданного в 1956 г. в Московском физико-техническом институте, и профессором кафедры взрыва, которой заведовал академик Михаил Алексеевич Лаврентьев. Поэтому в то время интересы Моисеева фокусировались на быстропротекающих процессах и на гидродинамике волн, поскольку тема его докторской диссертации была связана с теорией волн. Первыми сотрудниками лаборатории были Э. Борисова, П. Корявов и Р. Синюков. Неудивительно, что первой задачей, которую решали сотрудники отдела, была плоская задача об ударном погружении клина в воду с возникновением брызговой струи. Это была сложная нелинейная задача с неизвестной границей — форму струи надо было найти из решения задачи. Для решения ее был создан численный метод, ориентированный на ЭВМ “Стрела”. Это был наш первый опыт решения сложных задач на ЭВМ. Решение сложных прикладных задач механики, гидродинамики, оптимального управления, исследования операций, проектирования, экономики на ЭВМ с тех пор стало главным направлением исследований лаборатории, а потом отдела.

В 1958 г. М.А. Лаврентьев уехал в Новосибирск организовывать Сибирское отделение АН СССР, и “взрывная” тематика в лаборатории стала быстро затухать. Самые значительные результаты здесь получили Б.Н. Румянцев, П.П. Корявов, К.А. Бежанов и Ю.Н. Павловский. Б.Н. Румянцев рассмотрел задачу о выходе волны на наклонный берег. П.П. Корявов решил цикл задач о струях жидкости и смешении потоков жидкости. К.А. Бежанов нашел решение задачи о дифракции плоской ударной волны, выходящей с берега на свободную поверхность

жидкости. Ю.Н. Павловский выполнил групповой анализ уравнений пограничного слоя и разработал численные методы расчета пограничного слоя сжимаемой жидкости на поверхности затупленного тела вращения.

Сам Н.Н. Моисеев продолжал заниматься теорией волн на поверхности тяжелой жидкости и динамикой тела с полостями, содержащими жидкость со свободной поверхностью. К середине 60-х гг. он, можно сказать, завершил линейную теорию движения тел с полостями, содержащими жидкость со свободной поверхностью. Им была предложена общая вариационная формулировка задачи не только для твердого, но и для упругого тела с идеальной жидкостью. В 1965 г. вышла в свет монография Н.Н. Моисеева и В.В. Румянцева “Динамика тел с полостями, содержащими жидкость”.

В лаборатории проходил семинар, в котором принимали участие известные специалисты в гидродинамике Я.И. Секерж-Зенькович, Н.В. Зволинский, М.И. Гуревич. Кроме сотрудников лаборатории в работе семинара участвовали ученики Н.Н. Моисеева из МФТИ и МГУ — аспиранты А.М. Тер-Крикоров, Ю.П. Иванюков, К.А. Бежанов, А.А. Петров, Б.Н. Румянцев, А.Г. Шмидт, П.С. Краснощеков. Все они внесли заметный вклад в теорию волн на поверхности жидкости и в динамику тел, содержащих жидкость со свободной поверхностью. В первую очередь надо отметить результаты А.М. Тер-Крикорова в теории волн в слоистой несжимаемой жидкости, которые составили его докторскую диссертацию. Ю.П. Иванюков рассмотрел волны на поверхности потока, стекающего по наклонной поверхности. А.Г. Шмидт исследовал задачу о волнах на поверхности вязкой жидкости. П.С. Краснощеков решил задачу о движении спутника, в полости которого содержится вязкая жидкость.

Расчет движения твердого тела, содержащего жидкость со свободной поверхностью, сводится к решению стандартных краевых задач о собственных колебаниях жидкости в полости тела, содержащей жидкость, и о присоединенных массах и моментах инерции жидкости. По решениям этих задач вычисляются коэффициенты в уравнениях движения тела, и задача о движении тела с жидкостью сводится к исследованию движения эквивалентного тела, к которому прикреплены маятники с заданными собственными частотами. В прикладных задачах полости имеют сложную форму, поэтому для решения краевых задач надо было изобретать эффективный численный метод, ориентированный на использование ЭВМ. Н.Н. Моисеев предложил вариационный метод решения задач, а А.А. Петров предложил эффективную численную реализацию вариационного метода. Вариационный метод широко использовался в практике расчетов.

Во второй половине 60-х гг. Н.Н. Моисеев прекратил заниматься динамикой тела с жидкостью. Последние результаты в отделе получил его ученик Ф.Л. Черноушко, построив асимптотическую теорию движения тела, содержащего вязкую жидкость. Эти результаты составили его докторскую диссертацию. В 1965 г. в отдел пришел В.В. Румянцев, он продолжил исследования в области механики, в частности, динамики тел с жидкостью. В 1973 г. В.В. Румянцев вместе со своими учениками выделился в самостоятельный отдел.

В 1980 г. за цикл исследований динамики тел с полостями, содержащими жидкость, Н.Н. Моисеев, А.А. Петров, В.В. Румянцев, Ф.Л. Черноушко получили Государственную премию СССР в области науки и техники.

На рубеже 50–60-х гг. Н.Н. Моисеев, занимаясь задачами о нелинейных волнах, начал интенсивно заниматься асимптотическими методами теории нелинейных колебаний. На какое-то время главной темой семинаров стали асимптотические методы, и следующее поколение учеников Н.Н. Моисеева, которые стали сотрудниками отдела, воспитывалось на асимптотических методах нелинейной механики. В.Н. Лебедев развил асимптотические методы в задачах о движении космических аппаратов с малой тягой. Он стал великолепным специалистом в своей области, увлеченно работал, но, к несчастью, скончался вскоре после защиты кандидатской диссертации. В задаче о входе космического аппарата в атмосферу асимптотические методы развил Ю.Г. Евтушенко. Методам усреднения в задачах о нелинейных колебаниях была посвящена кандидатская диссертация Ф.Л. Черноушко. Собственные исследования Н.Н. Моисеева завершились монографией “Асимптотические методы нелинейной механики”, вышедшей в издательстве “Наука” в 1966 г.

С начала 60-х гг. в лаборатории “Общая механика и гидродинамика” возникло новое направление исследований — методы оптимизации и теория управления. Главные усилия были направлены на разработку численных методов решения задач оптимального управления для решения прикладных задач. Этим занимались Ф.Л. Черноусько, И.А. Крылов, С.А. Соловьева, Н.К. Бурова, Н.Я. Багаева — следующее поколение сотрудников отдела. И.А. Крылов и Ф.Л. Черноусько предложили итерационный метод решения краевой задачи, которым можно было численно решать определенный класс задач оптимального управления. Исследования проводились в тесном сотрудничестве с проектными организациями. Так возникла задача о расчете траектории космического аппарата, которая не должна пересекать радиационные пояса Земли. Она не принадлежала классу, для которого были справедливы условия оптимальности Понтрягина. Исследование этой задачи породило новое направление исследований. Н.Н. Моисеев предложил оригинальный прямой метод численного решения задачи вариациями управления и траектории движения, направленными к минимуму функционала. Расчет траекторий облета радиационных поясов Земли был проведен Н.Я. Багаевой. Н.К. Бурова использовала этот метод для решения задачи о прокладке оптимального курса кораблей в открытых водах Мирового океана. Позже Ф.Л. Черноусько развил идею Н.Н. Моисеева и создал метод локальных вариаций, которым были решены разнообразные задачи механики и оптимального управления. Итог этим исследованиям подвела монография Н.Н. Моисеева “Численные методы в теории оптимальных систем”, опубликованная издательством “Наука” в 1971 г.

В 1968 г. лаборатория “Общая механика и гидродинамика” была преобразована в отдел “Методы оптимизации и теория управления”. Это событие формально закрепило смену тематики исследований отдела. К середине 60-х гг. сложились традиции отдела. Уровень научных притязаний, стандарты качества, выбор задач и подходы к их решению, отношение к коллегам определялись личностью заведующего отделом, который был, скорее, не администратором, а главой научной школы. Н.Н. Моисеев постоянно активно искал контакты с практиками, у них он находил постановки задач. В высшей степени он чувствовал, какие задачи актуальны, он искал такие задачи и разрабатывал методы их решения. Совершенно не свойственно было ему искать задачи под уже разработанные методы. Чем бы ни занимался Моисеев в течение тех тридцати лет, что руководил отделом, он делал одно и то же: искал новые задачи, которые можно будет решать в интересах страны на компьютерах новых поколений, и искал методы использования компьютеров для решения таких задач. “Мы должны быть готовы использовать новые компьютеры”, — повторял Никита Николаевич все эти годы.

В 1965 г. Н.Н. Моисеев организовал Всесоюзную летнюю школу по методам оптимизации. Школы проводились регулярно раз в два года до 1989 г. Со временем тематика школ значительно расширялась. Рассматривались вопросы моделирования экономики, исследования операций, теории управления, автоматизации проектирования. Читали лекции ведущие ученые страны. Активное участие в школах принимали сотрудники отдела, но не только они. Летние школы привлекли к Никите Николаевичу талантливую научную молодежь со всей страны, а он решающим образом повлиял на научную судьбу многих из молодых. В отдел все время приезжали молодые ученые со всего Советского Союза, в то время возникло множество дружеских и научных связей, которые продолжают существовать до сих пор. Через школу Моисеева прошли ленинградец профессор В.Ф. Демьянов, киевляне академик В.С. Михалевич, академики УАН Ю.М. Ермольев, Б.Н. Пшеничный, Н.З. Шор и профессора В.В. Шкурба и Е.А. Нурминский, минчане профессора В.А. Емеличев, В.С. Танаев, бакинец профессор Д.И. Бабаев, горьковчанин профессор Р.Г. Стронгин (теперешний ректор Нижегородского государственного университета), иркутянин профессор В.П. Булатов и Л.Т. Ащепков, профессор М.И. Дмитриев из Красноярска, москвичи профессора А.И. Пропой, А.Н. Дюкалов, В.В. Токарев, А.П. Уздемир, В.И. Гурман и еще многие другие.

Огромную работу в организации школ выполняла многолетняя помощница Н.Н. Моисеева В.М. Юрченкова. Вообще, Валя Юрченкова брала на себя всю рутину, связанную с текущей административной деятельностью в отделе, освободив Никиту Николаевича от многих мелких, но докучных каждодневных забот. Была она открытым, отзывчивым, добрым и веселым





10-я юбилейная Моисеевская школа (Иркутск, 1983 г.)

человеком. Помощница всегда стоит между начальством и сотрудниками. Никита Николаевич с самого начала создал в отделе обстановку полной демократии в научных дискуссиях и в личных отношениях. Валя окончательно изгоняла из нее всякие формальности, так что в отделе складывались отношения свободы и взаимной приязни. Они не мешали, а способствовали интенсивной работе в отделе.

В 1961 г. в отделе был создан сектор “Гидромеханика”. Им руководил В.Г. Срагович, хороший специалист в области случайных процессов. По замыслу, В.Г. Срагович должен был внести в отдел вероятностную культуру, необходимую для решения прикладных задач. Он был человеком увлекающимся и находил приложения в таких экзотических в то время областях, как нейрофизиология или теоретические основы футбола. Тем не менее и благодаря этому он воспитывал хороших специалистов, из них Г.А. Агасандян, Б.Г. Сушков, Ю.А. Флеров выросли в ведущих сотрудников отдела.

В 1966 г. Н.Н. Моисеев был избран членом-корреспондентом АН СССР по отделению механики и теории управления. После 1966 г. тематика исследований отдела стала быстро расширяться. Несмотря на тематическое разнообразие, все исследования имели общую цель — развитие методологии и методов математического моделирования, методов теории управления и ЭВМ для технико-экономических, социально-экономических, военных приложений. Никита Николаевич постоянно искал контактов с конструкторами, экономистами, военными, активно пропагандировал в правительстве научный подход к решению стратегических задач государственного развития.

Н.Н. Моисеев поручил А.А. Петрову возглавить группу, которая начала заниматься математической экономикой. В 1968 г. на основе этой группы был открыт сектор “Математическая экономика”, исследования которого были направлены на военно-экономические приложения. А.А. Петров и Ю.П. Иванюков предложили  $\pi$ -модель расширения и перестройки производства, с помощью которой задача перспективного планирования производства сводилась к задаче оптимального управления с фазовыми ограничениями. В сотрудничестве с НИИ-27 и ИМЭМО РАН был решен ряд задач военно-экономического планирования, этим занимались А.В. Лотов, В.Ю. Лебедев и А.А. Левиков. В то время А.А. Петровым была предложена постановка задачи о плане развития производства, который в любой момент времени допускал мобилизацию экономики за заданное время до заданного уровня. Задача о мобилизации сводилась к отысканию множества достижимых показателей динамической системы. Эту задачу решил А.В. Лотов, впоследствии он достиг существенных результатов в теории множеств достижимости и ее приложениях. А.М. Тер-Крикоров в общей постановке исследовал линейную задачу оптимального управления с фазовыми координатами и получил условия, при которых задача имеет



*Ю.И. Журавлев, С.П. Прохоров, Н.Н. Моисеев, Ю.Н. Павловский,  
Ю.Г. Евтушенко, А.А. Петров, А.В. Лотов, В.Ю. Лебедев*

экономически содержательные решения. А.Г. Шмидт занимался исследованиями качественных свойств траекторий оптимального экономического роста.

Исследования по экономической тематике интенсивно расширились. Ю.П. Иванюков со своими учениками разрабатывали модели для математического обеспечения программного метода планирования народного хозяйства, который был предложен Г.С. Пospelовым и Ю.П. Иванюковым. Сложилось отдельное направление исследований, и в 1982 г. из отдела выделился отдел “Проблемы моделирования”, сотрудники которого под руководством Ю.П. Иванюкова в контакте с плановыми органами разрабатывали методы анализа структуры экономики СССР по данным экономической статистики. В отделе выросли А.П. Абрамов, В.А. Бессонов, Д.М. Эдиев.

П.С. Краснощекову Н.Н. Моисеев поручил военную тематику. В 1966 г. П.С. Краснощеков, Ю.Н. Павловский и Ю.Г. Евтушенко в сотрудничестве с представителями Военной академии им. М.И. Фрунзе начали разрабатывать модели боевых действий. Через несколько лет П.С. Краснощеков создал модель боевых действий, которая существенно обобщала известную модель Ланчестера. Взяв в качестве исходного описания вероятностное описание взаимодействия боевых единиц и усреднив его, он получил нелинейную систему интегродифференциальных уравнений в частных производных, описывающих изменение плотностей боевых единиц противоборствующих сторон вследствие их передвижений и огневого взаимодействия. Правые части уравнений содержат интегралы типа взаимодействий, в которые входят управления: целераспределения боевых единиц. Замыкается система уравнениями перемещения боевых единиц, которые содержат другие управления: скорости перемещения боевых единиц. Ю.Г. Евтушенко вскоре отошел от этой работы и начал заниматься численными методами решения задач оптимизации, а Ю.Н. Павловский, Г.И. Савин и В.Ф. Огарышев довели модель Краснощекова до программной системы, годной для практических применений. Г.И. Савин построил трехуровневое (рота-батальон-полк, батальон-полк-дивизия, дивизия-корпус-армия и т.д.) универсальное описание структуры управлений боевыми единицами, которое давало эффективное выражение правых частей уравнений Краснощекова. Ю.Н. Павловский вместе с Г.И. Савиным и В.Ф. Огарышевым на базе этих описаний создали компьютерную систему моделирования боевых действий, в которой учитывался рельеф местности, дороги, инженерное укрепление местности, средства связи и т.д. Это был своеобразный электронный “ящик с песком” для командных штабных игр. У наших военных он не нашел практического применения, но во время угара перестройки и реформаторства, по-видимому, через военных информация об этих работах попала к американцам. Этим можно объяснить то, что неожиданно в 1993 г. П.С. Краснощеков и Г.И. Савин получили приглашение исследовательского центра армии США прочитать лекции по исследованию операций и моделям боевых действий.

На базе моделей экономики и моделей боевых действий в отделе была проведена имитационная игра взаимодействия граничащих между собой трех стран. На территории стран располагались экономические объекты и вооруженные силы. За каждую страну играли серьезные люди. Роль правительства страны Красноевтухии исполняли П.С. Краснощеков и Ю.Г. Евтушенко, правительства Гердавыдии — Ю.Б. Гермейер и Э.Г. Давыдов, правительства Ватерландии — И.А. Ватель и Ф.И. Ерешко. Правительство принимало экономические и военные решения, вплоть до объявления войны с использованием ядерного оружия, с помощью моделей рассчитывались последствия принятых решений. Ю.Н. Павловский и А.А. Петров были посредниками. Это была увлекательная игра, за нее болели все в отделе Н.Н. Моисеева. Читали регулярные коммюнике правительств, добровольно шпионили в пользу разных стран. Игра показала, какие нетривиальные возможности открывают подобные имитационные системы. Однако она не заинтересовала тех, кого, казалось бы, должна была заинтересовать.

В 1966 г. в отдел пришел крупный ученый и замечательный человек Ю.Б. Гермейер. Он возглавил исследования в области исследования операций и теории игр. Ю.Б. Гермейер развил теорию максимина и гарантированных оценок в исследовании операций. По существу, Ю.Б. Гермейер создал целую философию принятия решений. Его монографии “Введение



*Н.Н. Моисеев*

в теорию исследования операций” и “Игры с противоположными интересами” были пионерскими, идеи Ю.Б. Гермейера на много лет опередили мировой уровень и до сих пор разрабатываются в разнообразных приложениях теории игр. Ю.Б. Гермейер вырастил много учеников, которые стали активными сотрудниками отдела — И.А. Ватель, Ф.И. Ерешко, А.Ф. Кононенко, В.А. Горелик, В.Ф. Огарышев, Н.С. Кукушкин, И.С. Меньшиков. Работы их нашли приложения в теории иерархических систем, задачах исследования конфликтов и компромиссов, в проектировании экономических механизмов управления.

В 1970 г. в отдел пришел В.Р. Хачатуров с предложением использовать разработанный им метод решения класса задач целочисленного программирования для проектирования развития и обустройства нефтяных месторождений. Никита Николаевич оценил перспективность предложения и создал группу, а в 1974 г. — сектор “Методы проектирования развивающихся систем”. Под руководством В.Р. Хачатурова на ЭВМ БЭСМ-6 была создана система программ для расчета

технико-экономического проекта развития и обустройства нефтегазового месторождения. Прямо с печатающего устройства БЭСМ-6 проект поступал на обсуждение коллегии Министерства нефтяной и газовой промышленности. Потом В.Р. Хачатуров перенес свои методы на задачу развития и обустройства территорий и применил их для планирования экономического развития одной из провинций Кубы.

В 1973 г. по инициативе Н.Н. Моисеева начинается активное сотрудничество отдела с Международным институтом прикладного системного анализа в Вене по проекту “Водные ресурсы”. В течение двух лет в этой работе участвовали П.П. Корявов и другие сотрудники отдела. Было подготовлено два объемных отчета, которые содержали результаты работы по моделированию речных систем Дуная, Тисы и вопросы методологического и прикладного характера.

По мере углубления в проблемы рационального использования водных ресурсов и сохранения уникальных водных объектов начинались системные исследования конкретных водных объектов. Совместно с Ростовским университетом создавалась имитационная модель динамики и качества вод в Азовском море. Возникли контакты с Гидропроектом, Союзгипроводхозом, которые занимались вопросами речного стока северных и сибирских рек СССР в южные регионы страны, страдающие от дефицита воды, необходимой для развития сельского хозяйства и промышленности. Осуществление таких огромных по стоимости проектов могло иметь пагубное побочное влияние на природную среду и условия жизни людей. Для экспертизы проектов надо было разрабатывать методы системного анализа сложных систем и оценки последствий выполнения проектов с помощью математических моделей процессов и численных экспериментов на ЭВМ.



*П.П. Корявов, Н.Н. Моисеев в Венеции*

Для развития этих работ в 1977 г. в отделе были созданы сектор “Математическое моделирование водных систем”, который возглавил П.П. Корявов, и сектор “Рациональное использование водных ресурсов” под руководством Ф.И. Ерешко. В секторе П.П. Корявова были разработаны двумерные нестационарные модели движения вод с примесями в естественных водоемах с учетом русловых стоков и водозаборов потребителями под действием ветра и приливных течений. Для исследования моделей

и прикладных расчетов были разработаны эффективные численные методы, основанные на конечно-разностных схемах с применением криволинейных сеток. Была разработана система обработки гидрологической информации, предназначенная для подготовки исходных данных для математических моделей основных гидрологических процессов — руслового и поверхностного стоков, напорной и безнапорной фильтрации, созданы диалоговые системы для непрограммирующих пользователей.

Это дало возможность проанализировать несколько проектов, которые предлагались Союзгидропроектом и Гипроводхозом, в их числе оценки возможных изменений динамики вод Онежского озера вследствие реализации проекта переброски речного стока из Онежского озера через реку Вытегру, озеро Белое, Череповецкое и Рыбинское водохранилища в Волгу; расчеты взаимодействия поверхностных и подземных вод в бассейне реки Северной Двины; расчеты влияния на речной сток осушения болот в бассейне реки Ясельда. Проводились работы, связанные с использованием водных ресурсов и организацией сельскохозяйственного производства на мелиорированных системах.

В секторе Ф.И. Ерешко занимались задачами проектирования водохозяйственных систем и управления ими. С.А. Орловский решал задачу о проектировании систем орошения и ирригации Ирака. Г.А. Агасандян решил задачу об управлении попуском воды через плотины каскада ГЭС Большой Волги.

Исследования водных проблем вызвали у Н.Н. Моисеева интерес к общим экологическим проблемам. Однако модели экоценозов и популяций, глобальная модель циркуляции атмосферы создавались и исследовались отделом Ю.М. Свиричева и группой В.В. Александрова.

В 1969 г. на физтехе был создан факультет управления и прикладной математики. Н.Н. Моисеев был одним из инициаторов его организации и стал первым деканом ФУПМ. В отделе он организовал базовую кафедру “Исследование операций и теория управления” и много лет заведовал ею. Бессменным заместителем заведующего стал Ю.Н. Павловский, который вел дела кафедры. Профессорами кафедры были Ю.Н. Павловский, А.А. Петров, Ю.Г. Евтушенко. Через кафедру отдел регулярно получал пополнение молодых способных специалистов, которые активно включались в разработку непрерывно возникавших в отделе новых направлений. Через базовую кафедру Н.Н. Моисеева прошли сотрудники отдела А.В. Лотов, В.Ю. Лебедев, А.А. Левиков, А.В. Воротынцев, И.Г. Поспелов, А.А. Шананин и многие другие молодые люди, которые работали и продолжают работать в отделе.

В середине 70-х гг. в результате активного расширения исследований и укрепления многочисленных новых направлений молодыми специалистами отдел достиг критической массы и начал делиться. В 1973 г. П.С. Краснощеков по инициативе Н.Н. Моисеева начал заниматься трудной задачей автоматизации проектирования технических объектов. Как уже было сказано, Ю.Г. Евтушенко начал заниматься численными методами оптимизации, и на основе полученных результатов создал диалоговую систему оптимизации. Работа шла успешно, и в 1984 г. был организован отдел “Прикладные проблемы оптимизации”, который он и возглавил. В 1973 г. Ю.Н. Павловский возглавил сектор “Имитационные системы”, а в 1985 г. вместе со своими учениками и сотрудниками выделился в отдел под тем же названием. В 1988 г. был организован отдел “Плановые решения АПК” А.Ф. Кононенко. В 1985 г. в самостоятельный отдел “Методы проектирования развивающихся систем” выделился сектор В.Р. Хачатурова. В 1988 г. был организован отдел “Плановые решения АПК” А.Ф. Кононенко. В 1989 г. на базе сектора Ф.И. Ерешко был открыт отдел “Рациональное использование водных ресурсов”.



*П.С. Краснощеков и А.А. Петров*

Можно сказать, что плодотворность работы отдела и значимость полученных результатов получили косвенное одобрение, когда в 1984 г. Н.Н. Моисеев был избран действительным членом, а П.С. Краснощеков — член-корреспондентом АН СССР. В 1990 г. член-корреспондентом АН СССР был избран Ю.Г. Евтушенко.

Когда в 1987 г. Н.Н. Моисеев оставил пост заведующего отделом, в нем осталось три сектора — “Экономическое моделирование” Ю.П. Иванилова, “Математическое моделирование водных систем” П.П. Корявова и “Математическая экономика” А.А. Петрова. Отдел Н.Н. Моисеев передал А.А. Петрову. В 1990 г. произошла последняя реорганизация отдела. В предшествующие годы Н.Н. Моисеев и его ученики накопили большой опыт создания математических моделей в экономике, военном деле, проектировании сложных систем, исследовании операций. По существу, была создана методология математического моделирования в новых, нетрадиционных областях приложений. Методология переносила в новые области общие подходы к моделированию и стандарты качества моделей, сложившиеся в тех разделах физики, в которых использование математических моделей для понимания законов природы получило наибольшее развитие. Естественно было сконцентрировать знания, опыт и усилия. В 1990 г. было организовано отделение “Математическое моделирование систем и решений”, в которое вошли несколько отделов, занимавшихся близкими проблемами.

В новое отделение вошел отдел “Математическое моделирование экономических систем”, созданный на базе сектора “Математическая экономика” отдела “Методы оптимизации и теория управления”. Секторы Ю.П. Иванилова и П.П. Корявова вошли в новый отдел “Проблемы моделирования”, которым руководил Ю.П. Иванилов.

В отдел “Математическое моделирование экономических систем” вошли три сектора — сектор “Математические модели экономических структур” И.Г. Поспелова, сектор “Математические методы оценки экономических решений” А.В. Лотова и сектор “Математическое обеспечение вычислительных экспериментов в экономике” А.А. Петрова. Заведовать отделом стал А.А. Петров.

Реорганизация отдела была не просто актом администрирования, а организационным оформлением нового, успешно развивающегося направления исследований.

В 1975 г. А.А. Петров предложил новый класс моделей экономических систем. В то время в нашей стране математические модели использовались для расчета оптимальных отраслевых или территориальных планов. По результатам расчетов оценивался так называемый расчетный экономический эффект, т.е. разница между величиной экономического эффекта плана, рассчитанного с помощью модели, и величиной экономического эффекта плана, рассчитанного обычными госплановскими методами. Реальный экономический эффект, т.е. величина экономического эффекта от *реализации* плана, так же как и механизмы реализации плана, были вне интересов математического направления советской экономики. На Западе в то время в центре внимания математического направления экономики были модели экономического равновесия и модели оптимального экономического роста. Модель мировой динамики Дж. Форрестера была выражением критики господствующего направления, однако описания механизмов саморазвития экономики — обратных связей — не выдерживали сколько-нибудь серьезной критики. Возникло естественное стремление описать реальные механизмы саморазвития экономики, воздействия на них экономической политики государства и сопоставить результаты моделирования с данными об эволюции реальной экономики. Эта программа породила направление исследований, названное “Системным анализом развивающейся экономики”. Оно уже тридцать лет успешно развивается сначала в секторе, потом в отделе.

Системный анализ развивающейся экономики можно охарактеризовать как сочетание методологии математического моделирования и фундаментальных положений экономической теории для создания моделей, ориентированных на приложения. Общий подход заключается в следующем. Проводится системный анализ состояния конкретной экономики и экономических проблем в конкретный период времени для выяснения качественных особенностей экономических отношений, сложившихся в данной экономике на данный период времени. В результате анализа выделяются экономические агенты, материальные и финансовые активы и пассивы, которые характеризуют их состояние. Выписывается система уравнений материальных и финансовых балансов, в силу этих уравнений изменяются состояния экономических агентов (т.е. состояние

экономики). Правые части уравнений содержат переменные, описывающие поведение экономических агентов в совокупности. Поведение экономических агентов — это их планы, зависящие от состояний агентов, институциональных ограничений и их взаимной информированности. Планы согласуются описаниями механизмов взаимодействий экономических агентов. В описаниях поведения экономических агентов и их взаимодействий формализуются результаты проведенного системного анализа экономических отношений — это модель механизмов саморазвития экономики. Она содержит параметры, которые характеризуют государственную экономическую политику, например политику налогов и государственных расходов. Таким образом, модель экономики оказывается замкнутой в том смысле, что описывает воздействие государства на экономику через описание механизмов ее саморазвития. Чтобы понять существо процессов в экономике, надо выделить рациональную составляющую в экономических отношениях, соответствующую экономическим интересам агентов. По этой причине при описании поведения экономических агентов используются принципы рациональности.

Изложенный подход возник не сразу, а складывался эволюционно, на опыте исследований. Началось с самого простого. В 1975 г. А.А. Петров и И.Г. Поспелов построили модель совершенно конкурентной рыночной экономики. Модель описывала качественные особенности эволюции рыночной экономики: зависимость темпа роста от регулирования денежного обращения, возникновение инфляции при дефиците трудовых ресурсов и кризисный спад производства при дефиците природных ресурсов, возникновение длинных волн во временном ряде ВВП при учете технологического обновления производства. По той же схеме В.В. Кришталь построил модель, на которой исследовал влияние энергетики на развитие экономики. Г.Б. Молдашева с помощью модели исследовала влияние международной торговли и валютных обменов на эволюцию экономик стран — торговых партнеров. А.П. Крутов создал модель, в которой учел влияние государственных расходов, и с помощью модели проанализировал природу кейнсианских механизмов регулирования эволюции экономики. Это был период первоначального накопления опыта, результаты показали, что принятое направление перспективно.

Существенный вклад в развитие принятого направления внесли И.Г. Поспелов, А.А. Шананин и А.В. Лотов. В 1986 г. И.Г. Поспелов предложил вариационный принцип описания поведения экономических агентов. Он построил модель рынка, на котором действуют торговые посредники между поставщиками и потребителями. Состояние посредника торговца задавалось запасом товара и задолженностью, на которой начислялся заданный процент. Изменение состояния было описано случайным процессом сделок. Поведение торговца было описано вариационным принципом — минимизацией вероятности разориться из заданного состояния. Предполагалось, что частота сделок достаточно велика и каждая отдельная из них не приводит к разорению. Асимптотический анализ модели дал результаты фундаментального характера. Из модели была выведена денежная оценка товара — его меновая стоимость. Было показано, что исходный вариационный принцип описания поведения имеет эквивалентную формулировку — посредник стремится максимизировать среднюю прибыль, дисконтированную нормой процента по долгу. Если посредническая торговля рентабельна и спрос посредника на товар удовлетворяется поставщиком, то, как было показано, посредник быстро приводит рынок в стационарное состояние. Стационарное состояние естественным образом интерпретируется как равновесие рынка. В нем получает денежную оценку место торговца на рынке, его оборотные фонды (характерный неликвидный запас товара), а меновая стоимость товара оказывается пропорциональной запасу товара. Это означает, что возникает цена единицы запаса товара, и в модели она получает естественную интерпретацию как равновесная цена. Таким образом, из исходного вариационного принципа были выведены фундаментальные понятия политической экономии. В процессе этих исследо-



*И.Г. Поспелов и А.А. Шананин*

ваний возникло понимание роли стохастичности в описании экономических процессов и найдены подходы, которые легли в основу будущих исследований.

А.А. Шананин развил теорию агрегирования экономических описаний. В 1984 г. он вывел общее агрегированное описание производства неоклассической производственной функцией из детального исходного линейного описания производства распределением мощностей по леонтьевским технологиям. Им была установлена двойственность производственной функции и функции прибыли, что давало возможность восстанавливать производственную функцию по функции прибыли. Этот факт использовался для изучения структуры производственной функции и представимости ее распределением мощностей по технологиям. А.А. Шананин исследовал индексы спроса и цен потребительских продуктов, вывел условия существования индексов, проверка которых сводится к проверке условий интегрируемости функций спроса. Результаты теории агрегирования потребительского спроса им были использованы для решения задачи об агрегировании неоклассической модели межотраслевого баланса в производственную функцию. Можно сказать, что А.А. Шананиным была создана равновесная теория агрегирования — установлено, когда детальное равновесие рыночной экономики может быть представлено в агрегированном виде производственной функцией неоклассического типа. Совместно с А.А. Петровым он исследовал экономическое содержание процедур агрегирования экономических описаний. На примере межотраслевого баланса было показано, как агрегированное описание производства зависит от экономических механизмов регулирования производства. Между экономистами распространен метод оценки эффективности инвестиций по прибыльности в текущих ценах. Показано, что этот метод верен только при условии интегрируемости функций конечного спроса. Была установлена связь условий интегрируемости с распределением доходов в обществе. Именно функции спроса интегрируемы, если распределение доходов между общественными группами самосогласованно с их оценками уровня потребительских цен. Это означает, что рынок товаров должен быть в равновесии с рынком труда. А.А. Шананин совместно с Л.Я. Поспеловой и С.Д. Вратенковым разработал эффективный метод проверки, удовлетворяет ли массив данных торговой статистики условиям существования индексов спроса и цен, и расчета индексов в случае выполнения этих условий. Метод был реализован в диалоговой системе ИНДЕКС, с помощью которой можно анализировать структуру потребительского спроса и прогнозировать спрос по заданным ценам или цены по заданному спросу на потребительские товары. В частности, система дает возможность автоматически учитывать изменение потребительской корзины вследствие изменения потребительских цен и корректно рассчитывать темпы инфляции.

Как уже говорилось, А.В. Лотов возглавил исследования множеств достижимости управляемых систем. Он рассмотрел задачу о множестве достижимых значений критериев качества управляемой системы, заданной моделью и множеством допустимых управлений в общем виде, как задачу аппроксимации телесного множества, заданного в неявном виде отображением известного множества в многомерном пространстве. Вместе со своими учениками В.А. Бушенковым, О.Л. Черныхом, Г.К. Каменевым, Л.В. Бурмистровой, Р.В. Ефремовым, и В.Е. Березкиным он провел большой цикл исследований, результаты которых внесли существенный вклад в теорию аппроксимации выпуклых тел многогранниками и дали эффективный подход к решению задач многокритериальной оптимизации. Были созданы численные методы полиэдральной аппроксимации множеств достижимости для линейных динамических систем и методы полиэдральной оценки множества возможных состояний нелинейных динамических систем. В последние годы разработаны оптимальные численные методы полиэдральной аппроксимации выпуклых тел, в том числе теория оптимальности и двойственности методов полиэдральной аппроксимации. В нелинейных задачах многокритериальной оптимизации большой размерности были предложены численные методы аппроксимации оболочки Эджворта-Парето, в том числе для функций, задаваемых вычислительными модулями типа черного ящика. Разработанные методы реализованы в компьютерных программах, обеспечивающих эффективные графические методы поддержки принятия решений при нескольких критериях выбора. Создана целостная методология компьютерной поддержки решений в сложных ситуациях. Она применялась при выполнении проекта “Возрождение Волги”, при решении экономических задач и задач конструирования сложных технических систем. Программное обеспечение широко используется в процессе обучения студентов МГУ и других университетов России и за рубежом.



Изучая экономическую систему и создавая методы ее математического описания, исследователь постоянно сталкивается с двумя проблемами: понять и правильно отразить в модели, во-первых, все существенные особенности технологического уклада и производственных связей в экономике и, во-вторых, все существенные особенности экономических отношений. В связи с этим возникает проблема построения производственных функций сельского хозяйства, которые правильно отражали бы специфические особенности производственных циклов в растениеводстве и в животноводстве. Несмотря на то, что первая производственная функция Кобба-Дугласа была создана для описания сельскохозяйственного производства, проблема до сих пор остается нерешенной. Перед А.В. Воротынцевым была поставлена задача построить производственную функцию растениеводства на основе моделей агроценозов. А.В. Воротынцев в течение нескольких лет создал первоначальную версию модели агроценоза. При участии своего ученика М.Ч. Юсупова, который работал в Институте математики с Вычислительным центром Таджикской академии наук, он готовился к созданию системы мониторинга и прогнозирования урожайности хлопчатника в Таджикистане. Перестройка и распад СССР перечеркнули все планы. На основе новых версий модели агроценоза А.В. Воротынцев создает компьютерную систему НИВА, предназначенную для разработки моделей агроценозов и для обучения моделированию агроценозов. Проблема создания производственной функции растениеводства так и продолжает стоять.

Вернемся к основной тематике отдела. Можно сказать, что в 1986 г. закончился период первоначального накопления опыта. В конце этого года по инициативе заместителя Председателя правления Госбанка СССР В.А. Мясникова началось исследование реальных механизмов регулирования экономики СССР. Работа выполнялась совместно с сотрудниками Правления Госбанка СССР и завершилась созданием первой модели плановой административно-регулируемой экономики. Модель отражала существенные особенности эволюции экономики СССР — выпуск продукции, не находящей спроса, рост фондоемкости производственных мощностей, фиктивный рост производительности труда, дефицит потребительских товаров и рост материально-финансовой разбалансированности экономики. (Последнее особенно обсуждалось в то время экономистами.) Главное — модель явным образом описывала механизм возникновения этих явлений и влияние на них неполноты информированности плановых органов о состоянии экономики. И.Г. Поспелов и С.М. Гуриев провели исследование равновесия административно-регулируемой экономики и показали, что здесь роль цен выполняет показатель качества продукции. Началась перестройка, и в 1988 г. было принято решение о разделении Госбанка СССР на шесть банков, и такая перспективная работа прекратилась. Но с тех пор исследования отдела, в основном, направлены на анализ экономики СССР, а потом России.

А.П. Крутов, А.А. Петров, И.Г. Поспелов на основе модели экономики СССР создали модель плановой экономики с кооперативным сектором. Модель отражала существенные положения принятых в 1988 г. законов “О социалистическом предприятии” и “О кооперации”, которые вводили в советские экономические отношения элементы предпринимательства. Исследование модели показало, что принятые в период перестройки законы направляли экономику по тупиковому пути, который заведомо не вел к повышению ее эффективности, но для экономически активной части населения открывал возможности личного обогащения.

В 1990 г. начался новый период моделирования экономики. Модели стали использоваться для количественных оценок процессов эволюции российской экономики. В том году правительство страны заявило о необходимости проведения радикальной реформы экономики СССР. В мае 1990 г. на совещании в Институте экономики АН СССР был поставлен вопрос об оценке последствий либерализации цен по рецепту “шоковой терапии”, проведенной годом раньше в Польше. А.П. Крутов, А.А. Петров, И.Г. Поспелов с помощью разработанной модели показали, что либерализация цен неминуемо приведет в первые полгода к росту цен в десятки и сотни раз — не менее. Рост цен будет тем быстрее, чем более высокими сохранятся бюджетные расходы. Следовательно, неизбежно произойдет сильное сокращение бюджетных расходов, что приведет к дифференциации доходов населения и кризису бюджетной сферы — оборонного комплекса, здравоохранения, образования, науки, культуры. К тому же рост цен лишит население практически всех сбережений. Эти результаты были представлены экономическому советнику М.С. Горбачева академику С.С. Шаталину, Подкомитету по экономической реформе Верховного

Совета СССР, с ними знакомились представители КГБ. Правильных выводов не было сделано, и в 1992 г. предсказания, к сожалению, полностью оправдались.

В 1991 г. поступило предложение руководства сводного отдела Госплана СССР с помощью модели оценить состояние экономики и новые экономические тенденции. А.А. Петров, И.Г. Поспелов при участии группы студентов МФТИ построили модель многоукладной экономики, в которой описали главные особенности сложившихся к этому времени экономических отношений. С помощью модели было установлено, что в результате перестройки возникли такие экономические отношения, при которых увеличение экспорта сырья и энергоресурсов сопровождалось снижением производства (за счет сильного спада в оборонном секторе) и одновременным ростом реальных доходов населения. Эти явления усиливались по мере того, как увеличивалась спекулятивность потребительского рынка — относительная разность цен черного рынка и государственной розничной торговли. Возникла крайне неприятная экономическая ситуация. Увеличение экспорта сырья и энергоресурсов было выгодно населению в целом, хотя вызывало общий спад производства. Чем выше спекулятивность рынка, тем слабее стимулы трудиться у населения в целом — тот же уровень реальных доходов обеспечивался все меньшим уровнем производства. После перестройки у населения в целом уже возникли экономические стимулы к торгово-посреднической деятельности, особенно связанной с экспортом и импортом, и ослабли стимулы к производительному труду.

Весной 1993 г. был поддержан проект “Экономическая безопасность”, представленный отделом на конкурс исследовательских проектов в интересах экономической реформы, который объявил Центр экономической конъюнктуры и прогнозирования при Правительстве РФ. Через полгода А.А. Петров, И.Г. Поспелов и А.А. Шананин при участии А.Ю. Бузина и Н.Н. Оленева создали модель, отражавшую новые экономические отношения в России. Исследование модели дало возможность теоретически осмыслить, что же произошло с нашей экономикой в период 1989–1993 гг. И.Г. Поспелов и С.М. Гуриев на упрощенном варианте модели показали, что при сильной инфляции и задержках в обращении денег экономика может находиться в состоянии неэффективного равновесия; когда снижены уровень производства и реальные доходы населения, населению невыгодно сберегать, а производителям — инвестировать в производство. Увеличение льготных кредитов до определенного уровня ведет к росту производства и реальных доходов населения в инфляционном равновесии. Излишек кредитов только разгоняет инфляцию, при этом большая часть излишних кредитов достается добывающим отраслям, чья продукция составляет основные статьи экспорта. Недостаток кредитов подавляет производство и даже может вызвать дефляционный шок экономики. Комплекс экономических явлений, характерных для первого этапа реформы, был объяснен с единых теоретических позиций. С помощью модели регулярно проводились расчеты последствий разных вариантов государственной макроэкономической политики. Отметим лишь, что расчеты показали, что в 1992–1994 гг. экспортеры и импортеры получали в год 12–25 млрд. долларов чистых валютных доходов, большую часть которых они вывозили из страны.

В конце 1995 г. в отделе началось выполнение проекта “Математическая модель региональной экономики” по заказу Главного управления Центрального банка России по Свердловской области. В работе участвовали А.А. Петров, И.Г. Поспелов, А.А. Шананин, Н.Н. Оленев, С.М. Гуриев, Э.В. Автухович, С.В. Чуканов. В 1996 г. была создана математическая модель экономики региона, в которой были описаны существенные особенности возникших к тому времени в России новых экономических отношений и отражена специфика экономики Свердловской области. В процессе создания модели был решен целый ряд сложных вопросов математического моделирования экономики: поняты и описаны функции банковской системы в застойной экономике при низкой инфляции и механизмы образования “финансово-промышленных групп”, описано обращение продуктов по разным каналам и построена производственная функция нового типа, исследованы равновесия экономики, в которой существуют бартер и неплатежи. С помощью модели регулярно проводились аналитические и прогнозные расчеты состояния экономики Свердловской области на два месяца вперед и до конца года. Расчеты контролировались по шестидесяти показателям, из которых три четверти должны были с высокой степенью точности совпадать со статистическими данными. По состоянию экономики на конец мая 1998 г. с помощью модели был предсказан кризис банковской системы области в августе 1998 г.

В конце 1998 г. в результате обсуждений экономических проблем России с тогдашним аудитором Счетной палаты РФ В.С. Соколовым по его заказу началась разработка модели для оценки потенциала роста экономики России. Работа выполнялась под руководством А.А. Петрова большим коллективом, в который входили И.Г. Поспелов, А.А. Шананин, Н.К. Бурова, Б.Л. Дорин, С.С. Панов, И.Г. Поспелова, Я.М. Ташлицкая, С.В. Чуканов, Д.В. Шапошник. За основу был взят проект известного экономиста М.С. Бернштама ликвидации институциональной ловушки для инвестиций с помощью специального механизма выпуска и погашения облигаций государственного инвестиционного займа. Была создана модель, в которой были учтены главные положения проекта Бернштама, и с помощью модели выяснены условия реализуемости проекта и оценена его макроэкономическая эффективность. Из модели следовал ясный вывод, что потенциал роста экономики России сильно зависит от доверия населения к банковской системе, которое выражается величиной равновесного процента по сбережениям населения. Были оценены среднесрочные темпы роста ВВП и цен, пропорции ВВП, достижимые при тогдашних показателях эффективности экономики.

Когда в 2000 г. была опубликована стратегия экономического развития России, предложенная Центром стратегических исследований Грефа, довольно быстро была создана модель, отражающая основные положения стратегии, и оценены среднесрочные показатели роста, достижимые в результате реализации стратегии. Расчеты показали, что темпы роста ВВП, которые ожидали авторы программы, реализуемы, но темпы инфляции будут выше ожидаемых ими.

В 2002 г. по инициативе Е.П. Велихова была создана российско-американская группа для анализа проблем энергетики, и сотрудники отдела приняли участие в работе этой группы. А.А. Петров, А.А. Шананин и Н.К. Обросова создали модель экономики России, в которой был выделен топливно-энергетический сектор. С помощью модели были исследованы разные сценарии экономического роста России, оценены среднесрочные темпы роста ВВП и цен, соотношение цен и пропорции в производстве ВВП энергопотребляющего сектора и топливно-энергетического сектора. Эти результаты вошли в итоговый доклад группы. А.А. Шананин и Н.К. Обросова продолжают совершенствовать модель и используют ее для оценки последствий реформирования топливно-энергетического комплекса России.

В 2003 г. И.Г. Поспелов, можно сказать, обобщил предшествующий опыт создания моделей, описывающих эволюцию экономики. Он предложил модели межвременного равновесия с капиталом, основанные на принципе рациональных ожиданий экономических агентов. Анализ моделей показал, что они описывают многие из тех качественных особенностей эволюции переходной экономики, которые прежде были описаны разными моделями. В моделях межвременного равновесия унифицированы описания поведения и взаимодействий экономических агентов, а это дает возможность использовать при создании моделей компьютерную систему интеллектуальной поддержки моделирования экономики. В 2004 г. модель межвременного равновесия была использована для оценки теневого оборота и налогооблагаемой базы в экономике России. Эта работа проводится по заказу ГНИИВЦ Министерства по налогам и сборам РФ под руководством И.Г. Поспелова. В ней активно участвуют М.А. Хохлов, М.Ю. Андреев, Н.Н. Оленев, И.И. Поспелова.

С начала реформы российская экономика находится в состоянии перманентной смены экономических отношений. Так как экономические отношения определяют внутренние механизмы эволюции экономики, то часто вместо старой модели экономики приходится создавать новую модель. При этом, как правило, новую модель требуется создать в короткое время, а системный анализ новых экономических отношений, состояния экономики с последующей формализацией результатов в описаниях модели — дело сложное и трудоемкое. Поэтому в 1995 г. в отделе началось создание компьютерной системы интеллектуальной поддержки математического моделирования экономики ЭКОМОД. Система основана на канонической форме представления модели экономики, предложенной А.А. Петровым, И.Г. Поспеловым, Л.Я. Поспеловой. В создание и развитие системы ЭКОМОД существенный вклад внесли И.Г. Поспелов, Л.Я. Поспелова, Н.К. Завриев, М.А. Хохлов. В настоящее время система ЭКОМОД, реализованная в среде системы Maple, содержит несколько уровней контроля правильности соотношений модели и автоматизирует рутинные операции на всех стадиях создания модели, ее исследования и

проведения расчетов. Без использования ЭКОМОД заказанный ГНИИВЦ Министерства по налогам и сборам РФ проект, о котором говорилось выше, не мог бы быть выполнен за то короткое время, которое отпустил заказчик.

Каждый из перечисленных проектов имел целью решение актуальных проблем переходного периода в российской экономике. При выполнении каждого из проектов возникали задачи, которые не были решены ни экономической теорией, ни прикладной математикой. Поэтому выполнение проектов сопровождалось фундаментальными исследованиями проблем математического описания и анализа экономических систем и процессов. В связи с этим надо еще раз отметить результаты А.В. Лотова, И.Г. Поспелова, А.А. Шананина и их учеников. Тематика фундаментальных исследований отдела расширилась в 1993 г. с приходом в отдел Н.С. Кукушкина. Он развивает оригинальное направление в теории игр, которое освобождает теоретико-игровые структуры от традиционных предположений о выпуклости.



*Г.С. Каменев, Н.С. Кукушкин*

Всего за последние десять лет сотрудники отдела опубликовали 30 монографий и около 250 статей в ведущих научных изданиях. В отделе работают 6 докторов и 10 кандидатов физ.-матем. наук. Заведующий отделом А.А. Петров в 1991 г. был избран чл.-корр., а в 1997 г. — действительным членом Российской академии наук. С 1993 г. исследования отдела каждый год поддерживаются несколькими грантами РФФИ, а с 1996 г. — грантами Президента РФ поддержки ведущих научных школ. Работы отдела известны в стране и за рубежом. Многие сотрудники отдела отмечены отечественными и зарубежными премиями и наградами.



*Принимаем немецкого гостя (он фотографирует): Л.Я. и И.Г. Поспеловы, Н.К. Бурова, А.А. Петров, А.А. Шананин, А.В. Лотов, В.А. Петрова*

В теперешних условиях успешность деятельности отдела определяется четкостью организации. Этим сотрудники отдела обязаны Н.К. Буровой. Она взяла на себя все трудные обязанности, связанные с ведением планов отдела и отчетности по планам и многочисленным проектам. Замечательно, что Н.К. Бурова не только ведет дела отдела. Неформальная жизнь отдела во многом определяется ее доброжелательностью, активностью и заботливостью.

Сотрудники отдела ведут активную преподавательскую деятельность. А.А. Петров является научным руководителем факультета управления и прикладной математики (ФУПМ) и заведует кафедрой на этом факультете МФТИ. И.Г. Поспелов является профессором МФТИ, МГУ и ГУ-ВШЭ. А.А. Шананин — декан и профессор ФУПМ МФТИ, профессор МГУ и РУДН, А.В. Лотов — профессор МГУ и ГУ-ВШЭ, Н.Н. Оленев — доцент МФТИ и РУДН, И.С. Меньшиков — доцент МФТИ, Л.Я. Поспелова — доцент МФТИ и Института естественных наук и экологии при РНЦ “Курчатовский институт”, Н.К. Обросова — доцент МФТИ и РУДН, И.И. Поспелова — доцент ГУ-ВШЭ, ассистент МГУ. В общей сложности они читают 26 курсов по исследованию операций, математической экономике и математике, руководят дипломными работами студентов и диссертационными работами аспирантов.

За последние десять лет сотрудниками отдела и под их руководством защищены 4 докторские диссертации по физ.-матем. наукам, 15 кандидатских диссертаций и много более полутора сотен дипломных работ. Ежегодно в исследованиях отдела принимают участие примерно 15-20 студентов и аспирантов. К сожалению, при тех условиях, в которых последние 15 лет работают институты РАН, молодые люди, получив образование и опыт, уезжают за границу или переходят на работу в коммерческий сектор. На место их приходят новые молодые люди и включаются в работу, помогают решать новые задачи. Отдел продолжает активно жить благодаря энтузиазму и преданности науке старшего поколения. К пятидесятилетию Вычислительного центра им. А.А. Дородницына Российской академии наук старшее поколение сотрудников отдела пришло еще полным сил.

### Основные монографии сотрудников отдела

1. Кукушкин Н.С., Морозов В.В. Теория неантагонистических игр. М.: Изд-во МГУ, 1984, 104 с.
2. Петров А.А., Поспелов И.Г., Шананин А.А. Опыт математического моделирования экономики. М.: Энергоатомиздат, 1996. 558 с.
3. Петров А.А. Экономика. Модели. Вычислительный эксперимент. М.: Наука, 1996. 344 с.
4. Петров А.А., Поспелова Л.Я., Поспелов И.Г. Система интеллектуальной поддержки математического моделирования экономики ЭКОМОД. М.: ВЦ РАН, 1996. 82 с.
5. Лотов А.В., Бушенков В.А., Каменев Г.К., Черных О.Л. Компьютер и поиск компромисса. Метод достижимых целей. М.: Наука, 1997. 239 с.
6. Петров А.А., Поспелов И.Г., Шананин А.А. От Госплана к неэффективному рынку: Математический анализ эволюции российских экономических структур. The Edwin Mellen Press, Lewiston–Queenston–Lampeter, NY, USA, 1999. 393 p.
7. Лотов А.В., Бушенков В.А., Каменев Г.К. Метод достижимых целей. Математические основы и экологические приложения. Mellen Press, Lewiston, NY, USA, 1999. 400 с.
8. Автухович Э.В., Гуриев С.М., Оленев Н.Н., Петров А.А., Поспелов И.Г., Шананин А.А., Чуканов С.В. Математическая модель экономики переходного периода. М.: ВЦ РАН, 1999. 143 с.
9. Автухович Э.В., Бурова Н.К., Дорин Б.Л., Панов С.С., Петрова А.А., Поспелов И.Г., Поспелова И.И., Ташлицкая Я.М., Чуканов С.В., Шананин А.А., Шапошник Д.В. Оценка потенциала роста экономики России с помощью математической модели. М.: ВЦ РАН, 2000. 154 с.
10. П.С. Краснощеков, А.А. Петров. Принципы построения моделей. Изд. II, пересмотренное и дополненное. М.: Фазис, 2000. 412 с.
11. Петров А.А. Об экономике языком математики. М.: Фазис, 2003. 112 с.
12. Поспелов И.Г. Модели экономической динамики, основанные на равновесии прогнозов экономических агентов. М.: ВЦ РАН, 2003. 200 с.
13. Поспелов И.Г. Моделирование экономических структур М.: ФАЗИС–ВЦ РАН, 2003. 208 с.
14. Lotov A.V., Bushenkov V.A., and Kamenev G.K. Interactive Decision Maps. Approximation and Visualization of Pareto Frontier. Kluwer Academic Publishers, 2004, 310 p.

## ОТДЕЛ ИНФОРМАЦИОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

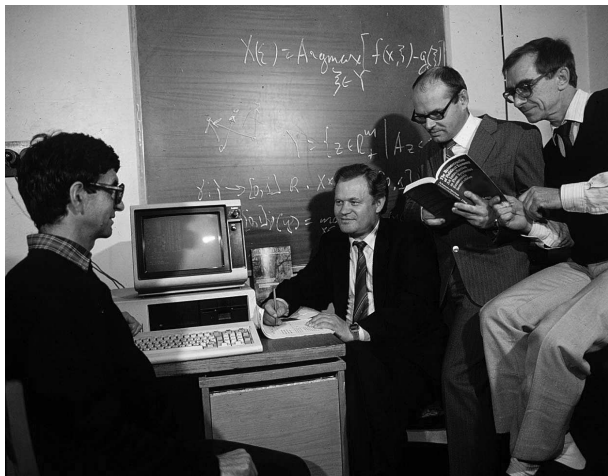
Ф.И. Ерешко

История отдела неразрывно связано с личностью и деятельностью Н.Н. Моисеева и всего того коллектива, который образовался вокруг Никиты Николаевича Моисеева и стал школой Моисеева. Наше становление пришлось на тот период деятельности Н.Н., который впоследствии А.А. Петров охарактеризовал, как “буря и натиск”. Мы шли вслед за Н.Н. Моисеевым. Поэтому отсчет истории нужно начинать с тех моментов, когда все мы — из ядра отдела: И.А. Ватель, Ф.И. Ерешко, К.К. Мосевич, Г.А. Агасандян, И.И. Гасанов, Н.С. Кукушкин, А.Н. Ермолов, С.А. Орловский, Е.М. Столярова — оказывались в ВЦ и начинали трудиться во благо науки и нашего коллектива.

### Теория

Большое влияние на принципы построения математического обеспечения для различных прикладных проектов, которые разрабатывались в отделе, оказали идеи Ю.Б. Гермейера в области исследования операций и теории иерархических игр.

В работе сотрудников отдела всегда объединялись научная, теоретическая, абстрактная, фундаментальная и прикладная компоненты. Цикл разработки конкретного проекта, как правило, составлял семь лет. По самой логике организации решения прикладных задач на первом



“Позиция у доски”: Г.А. Агасандян, Ф.И. Ерешко, Н.С. Кукушкин, С.А. Орловский

месте были вычислительно большие задачи. Вслед и параллельно с прикладной постановкой проводилась чисто теоретическая исследовательская работа по прикладной теме. Но мы пришли в сектор со своими теоретическими интересами, у каждого уже был свой задел, поэтому и первые публикации сотрудников были из прошлого: Г.А. Агасандян — адаптивные системы, И.А. Ватель — принятие решений, Н.С. Кукушкин — теория игр, С.А. Орловский — нечеткие системы, Е.М. Столярова — численные методы и т.д. И это было хорошо. Потому что позволяло взглянуть на конкретную задачу с разных сторон. И поэтому намеренно, в практических задачах сначала проводилась адаптация прошлых теоретических разработок к принятым практическим заказам, затем осуществлялось

развитие необходимого вычислительного инструментария, в обязательном порядке вычислительные системы и эксперименты для насущного решения практической части, затем теоретический рывок в будущее уже в конкретной области. Этот стиль был преобладающим в ВЦ, также делали и другие коллеги в других отделах.

Но и просто теоретические исследования на избранные темы в областях принятия решений, теории игр, исследования операций, системном анализе не прерывались ни на минуту. Это была непрерывность научной работы. И это видно из перечня публикаций ниже.

### Прикладные задачи

**Водный проект.** В 1977 г. удалось получить 15 ставок в ВЦ, а это значило, что штатная численность Академии наук была увеличена на 15 единиц, утверждена новая численность ВЦ по г. Москве, и соответственно увеличен бюджет ВЦ на необходимую сумму для создания соот-

ветствующих подразделений. В ВЦ был создан сектор рационального использования природных ресурсов, который стал стержнем будущего отдела и который существует до сих пор. Базовыми задачами сектора стали водные задачи в экономике страны. Основной мотив — водные ресурсы и исследование операций. Кроме того, в те годы Н.Н. Моисеев начал активно развивать математические модели и методы системного анализа, и в нашу жизнь вошел Международный институт прикладного системного анализа (МИПСА — International Institute for Applied System Analysis), расположенный в г. Лаксенбург близ г. Вена (Австрия). В Вене к этому времени плотно проработал П.П. Корявов, принявший участие в разных задачах Международного института прикладного системного анализа, в частности в проекте Тиса (приток Дуная). Уже прошли значительные семинары по водной тематике в стране (см. публикации ниже), где Н.Н. Моисеев и члены его команды демонстрировали большие теоретические возможности ВЦ.

1. *Агасандян Г.А., Моисеев Н.Н. и др.* Методы системного анализа в проблеме рационального использования водных ресурсов // Тр. междунар. конф. “Моделирование экономических процессов”. Ереван–ВЦ АН СССР, Москва, 1974.
2. *Агасандян Г.А., Моисеев Н.Н. и др.* Советский вариант концепции водного проекта и особенности региональных проектов // Методы системного анализа в проблеме рационального использования водных ресурсов. Международный институт системного анализа, Лаксенбург, Австрия, 1974. Т. 1. Гл. 1.
3. *Агасандян Г.А.* Модели речного стока и состояния водной среды // Методы системного анализа в проблеме рационального использования водных ресурсов. Международный институт системного анализа, Лаксенбург, Австрия, 1974. Т. 1. Гл. 1.
4. *Агасандян Г.А.* Стохастические модели водохозяйственных систем, Методы системного анализа в проблеме рационального использования водных ресурсов. М.: ВЦ АН СССР, 1974. Т. 2.
5. *Ватель И.А.* Некоторые вопросы моделирования процессов принятия решения в задачах рационального использования водных ресурсов. Методы системного анализа в проблеме рационального использования водных ресурсов. Международный институт системного анализа, Лаксенбург, Австрия, 1974. Т. 1. Гл. 7.

Конкретная деятельность в секторе вслед за теорией уже носила прикладной характер. Партнером сектора в прикладной области был определен ведущий институт в сфере водного проектирования в СССР “Союзгипроводхоз”, где основные усилия были направлены на разработку водохозяйственных проектов разного масштаба: от стран и регионов до отдельных хозяйств. Основная задача, которую поставил Н.Н. Моисеев, состояла в привнесении в практику водохозяйственного проектирования идей и методов системного анализа, что вылилось в разработку методов построения математического обеспечения для автоматизации проектирования водохозяйственных систем. Когда началось наше тесное взаимодействие с конкретными специалистами, то главная проблема на первом этапе состояла в том, чтобы просто понять первостепенные проблемы проектировщиков, которые они излагали на своем языке. Нужно было не только освоить их язык, но затем суметь перевести все их представления на формальный лад и потом по результатам расчетов убедиться, что математическое моделирование и вычислительный арсенал позволяют сделать труд проектировщиков более эффективным в сотни и тысячи раз. Особенно эффективно это удалось продемонстрировать вначале на Иракском проекте, затем и в “Союзгипроводхозе” на серии конкретных проектов внутри страны. Надо сказать в среде проектировщиков в водном хозяйстве, как и везде, были люди, которые вначале встречали нас в штыки, а были специалисты, которые сходу принимали предложенную нами схему работ и становились нашими партнерами и друзьями. В конце концов, сектор занял свою нишу в теории и практике водного хозяйства.

Постепенно относительно концепции проектирования сформировались и были приняты следующие установки. Разработка систем поддержки принятия решений в проектах рационального использования природных ресурсов предполагает планомерный анализ целей проекта, исследование взаимосвязей отдельных блоков, подготовку информации для расчетов, разработку расчетных процедур и опирается на специальное математическое обеспечение, которое включает в себя создание систем математических моделей, реализацию их на ЭВМ в виде отдельных модулей, разработку информационной базы и прикладного программного обеспечения, разработку процедур согласованного принятия решений отдельными экономическими агентами.

В целом, природохозяйственные системы обладают следующими свойствами:

- **динамичность** — системы непрерывно развиваются, поступают водные ресурсы, идет рост растений и животных, осуществляются технологические операции, трансформируются основные фонды, происходит оборот стада, не прерываются транспортные потоки и т.д.;

- **наличие неопределенных и неконтролируемых факторов** — многие параметры природных систем носят неопределенный или неконтролируемый характер. Это связано, с одной стороны, с неопределенностью в развитии погодно-климатических ситуаций, а с другой — с неконтролируемостью поведения различных составных частей системы, имеющих иногда свои собственные, отличные от целей системы, подцели и задачи;

- **многокритериальность** — сложная природохозяйственная система кроме задачи гомеостаза имеет обычно еще целый набор формально и неформально заданных целей, четко и нечетко сформулированных критериев функционирования и развития;

- **иерархичность** — сложная природохозяйственная система структурно состоит из набора иерархически соподчиненных систем по территориальному и объектно-отраслевому признаку. Например, агропромышленный комплекс региона можно разделить, с одной стороны, по территориальному признаку на агропромышленные комплексы отдельных районов, а с другой стороны, по отраслевому — на подсистемы растениеводства, животноводства, переработки.

Объекты, принадлежащие каждому структурному уровню, могут рассматриваться и как системы, образованные из подсистем (объекты более низких уровней), и как подсистемы, входящие в состав некоторой системы (объект более высокого уровня).

Мы отметили, что при разработке математического обеспечения проектирования и технических систем и региональных комплексов возникают принципиальные методологические проблемы, связанные с анализом и синтезом иерархических структур. Так, *при разработке водных проектов* на уровнях страны, региона, бассейнов рек *главный инженер проекта выполняет на верхнем уровне проектирования координирующую роль*, — он распределяет проектные задания по выпуску продукции, назначает ограничения по ресурсам и ставит цели проектных проработок перед отделами, производящими трудоемкие расчеты на нижних уровнях иерархии проектирования. Естественно, что при этих условиях *диалоговая процедура расчетов*, реализуемая на ЭВМ, должна определенным образом *отражать иерархию взаимоотношений в проектной организации*. Поскольку система моделей принципиально имеет блочную структуру (в силу разнородности содержательных процессов), а перед математическим обеспечением в целом ставится задача выработать варианты проектных решений, неуплучшаемых по системе заданных критериев, возникает проблема *декомпозиции* в исходной многокритериальной задаче распределения ресурсов и затем *координации* вычислительных модулей, т.е. задача синтеза иерархической структуры математического обеспечения.

Таким образом, атрибут *иерархии* в структуре математического обеспечения как инструмента автоматизации проектирования проявляется в двух аспектах. *Во-первых, в создании имитационной системы* с двумя уровнями описания, где *на первом уровне* находятся подробные модели, описывающие функционирование объекта управления — модели водных ресурсов, сельскохозяйственного производства, гидроэнергетики, рыбного хозяйства и т.д., а *на втором уровне* находятся соответствующие *упрощенные модели* (за счет агрегирования переменных и аппроксимации сложных зависимостей). Модели второго уровня входят в буферный блок, и на их основе главный инженер реализует концепцию проекта, осуществляя согласование отдельных частей проекта. *Во-вторых*, в том, что расчеты при согласовании отдельных частей проекта проводятся на основе *иерархической декомпозиции* исходной многокритериальной задачи распределения водных ресурсов. Данная декомпозиция основывается на математических конструкциях, разработанных в рамках информационной теории иерархических систем, и отражает описанные выше взаимоотношения в проектной схеме.

Несмотря на разнородность исходных содержательных посылок, общим для проектов рационального использования природных ресурсов является *иерархичность структуры системы моделей*, входящих в математическое обеспечение. *Это предопределило использование математического аппарата, развитого в рамках информационной теории иерархических систем.*



Большое место в работе сектора занимало сотрудничество с Международным институтом прикладного системного анализа (МИПСА) (методологический, водный, аграрный проекты). Все это подкреплялось тем, что в МИПСА долгое время работал сотрудник нашего сектора С.А. Орловский. С его легкой руки появились работы по проектам в Голландии, Швеции, достойно были представлены наши работы не только сектора, но и ВЦ (А.В. Лотов, В.Ю. Лебедев и др.). Прекрасную встречу-презентацию работ ВЦ С.А. Орловский организовал по приезду в Вену Н.Н.Моисеева. Прекрасное знание английского языка, веселый нрав, высокий профессионализм позволили С.А. Орловскому достойно представлять ВЦ в МИПСА. Он изготовил много публикаций в секторе и в МИПСА, более 45 работ по задачам управления при наличии нечетких отношений (fuzzy), по водной и с/х тематике. Вот некоторые из них (нумерация работ по списку работ С.А. Орловского):

1. On Programming with Fuzzy Constraint Sets. *Kybernetes*, 1977, № 1. P. 197–201.
2. Decision-Making with a Fuzzy Preference Relation // *Fuzzy Sets, and Systems*. 1978. № 1, 3. P. 155–167.
4. An Investment Timing Model for Salinity Management via Non-Convective Ponds (with T. Hughes), Working Paper WP-82-98, International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA), Laxenburg, Austria, 1982.
5. A Min-Max Approach to Reservoir Management (with S. Rinaldi and R. Soncini-Sessa), Collaborative Paper CP-82-78, International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA), Laxenburg, Austria, 1982.
11. Проблемы принятия решений при нечеткой исходной информации. М.: Наука, Физматлит, 1981.
17. Fuzzy Information in Problems of Resources Allocation, Proceedings of 9th World Congress of IFAC. Vol. IV. P. 132–135, Budapest, 1984.
28. Fuzzy Optimization and Mathematical Programming: A Brief Introduction and Survey (with J. Kacprzyk) // *Soft optimization using fuzzy sets and possibility theory / J. Kacprzyk and S. Orlovski (Eds.)*, Reidel, 1987. P. 50–72.
34. (with L.M. Kitainik and M. Roubens) Fuzzy information clustering and choice analysis system (FICCAS), IFSA'91, Brussels, 1991.
44. (соавт. Ю.Г. Любимова, Д.Э. Подобаева) Исследование корреляций между статьями экстерьера и структурами пород лошадей: новые математические методы, программные мредства // Сб. Тр. ВНИИК Рос. Акад. Сельхоз. наук, 1996, P. 244–263.

Дружеские отношения сложились у нас с коллегами из Института водных проблем (группа В.Г. Пряжинской) и Ростовского Государственного Университета (Ю.А. Домбровский, Ф.А. Сурков, В.Л. Шустова). Мы проводили совместные семинары и совместные работы. Книга патриархов ИВП Крицкого и Менкеля содержала ту культуру, которая была достигнута нашей инженерной и научной мыслью к этому времени в водном деле, просто кладезь постановок задач управления и исследования операций, системного анализа, бери и делай задачи, жаль не удалось сделать, что хотелось. Семинары в Абрау-Дюрсо, которые проводились замечательными энтузиастами из РГУ составили целую эпоху в развитии водной тематики.

В 1977–1982 гг. сотрудники сектора приняли активное участие в большом проекте в рамках контракта между СССР и Ираком “Генеральная Схема Рационального размещения водных, земельных и трудовых ресурсов Иракской республики”. Отдельные разделы нашли свое отражение в отчете Ф.И. Ерешко “Элементы математического обеспечения” в кн.: *General scheme of water resources and land development in IRAQ, appendices, Book 5, (Description of mathematical models)*, Moscow-Baghdad, 4–18 с., 44–66 с., V/O Selkhozpromexport, 1982.

В этом проекте заглавную роль от нашего сектора сыграл К.К. Мосевич. Он переработал огромный объем содержательной и числовой информации, и провел большое количество имитационных экспериментов. Будучи человеком чрезвычайно сдержанным и требовательным, К.К. Мосевич терпеть не мог публиковаться. С большим трудом удалось изъять из него некоторые результаты по Ираку в публикации: *Мосевич К.К. Имитационная модель водобалансовых расчетов*. М.: ВЦ РАН, 1999.

Состоялись длительные командировки сотрудников ВЦ и сектора в Ирак. Были разработаны несколько моделей: размещения производительных сил на территории в оптимизационном (Ф.И. Ерешко, А.А. Станевичюс) и имитационном вариантах и модель водобалансовых расчетов водной системы Тигр-Евфрат. Работа велась в тесном контакте с сотрудниками “Генсхемы”

с нашей стороны и со стороны Ирака. Расчеты велись на ЭВМ “Роботрон”(ЕС-1040). Большим подспорьем в работе проектировщиков в Багдаде оказались программные комплексы К.К. Мосевича, поскольку те варианты размещения производства по всей территории Ирака, которые они обсчитывали по несколько месяцев, К.К. Мосевич рассчитывал за несколько минут.

В секторе также была разработана серия моделей размещения аграрного производства для европейской территории Союза, в частности для Волго-Камского бассейна. Эти расчеты велись Гасановым И.И. и Огневцевым С.Б. совместно со специалистами “Союзгиропводхоза”. Н.Н. Моисеев внимательно следил за ходом работ, и результаты расчетов получили большое его одобрение. Выводы, которые сделали И.И. Гасанов и С.Б. Огневцев, говорили о большой организационной устойчивости системы производства и большой их корреляции с погодными условиями.

Большее и принципиальное продвижение имело место в задачах управления Волго-камским каскадом водохранилищ. Системные результаты (теоретические и практические), полученные Агасандяном Г.А. для построения диспетчерских правил управления каскадами водохранилищ, выдвинули его на передовую позицию в области управления водными объектами. На основе полученных результатов Г.А. Агасандян в 1990 г. успешно защитил докторскую диссертацию. Оппонентами были ведущие водохозяйственники страны.

Результаты сектора нашли свое отражение в публикациях:

1. *Ерешко Ф.И., Моисеев Н.Н.* Системный подход к исследованию проблемы рационального использования водных ресурсов региона. Отчет АН СССР по проблеме ГКНТ 0.85.06, НГР 76024177, М.: ИВП АН СССР, 1980. С. 209–264.
2. *Berezner A.S., Ereshko F.I.* Coordination of Models in Software Systems for Large Scale Water Resources Projects // *Water Supply&Management*. 1980. V. 4. P. 253–262.
3. *Березнер А.С., Ерешко Ф.И., Лотов А.В., Моисеев Н.Н.* Системный подход к исследованию проблемы межбассейновой переброски стока (на примере переброски части стока северных рек СССР на Волгу) // *Водные ресурсы*. 1981. № 1. С. 5–22.
4. Математическое обеспечение для автоматизации проектирования водохозяйственных систем. Отчеты ВЦ АН СССР, 1977–1983 гг.
5. *Березнер А.С., Ерешко Ф.И.* Системный анализ в водном хозяйстве // *Гидротехника и мелиорация*. 1980. № 8. С. 78–81.
6. *Агасандян Г.А.* О принципах построения диспетчерских правил управления режимом работы Волжско-камского каскада. М.: ВЦ АН СССР, 1983.
7. *Ермолов А.Н., Меньшиков И.С.* К математической теории управления каскадом водохранилищ (информационный аспект). М.: ВЦ АН СССР, 1983.
8. *Ерешко Ф.И.* Иерархические декомпозиции в водохозяйственных задачах. М.: ВЦ АН СССР, 1984. 45 с.
9. *Агасандян Г.А.* Методика построения диспетчерских правил управления каскадами водохранилищ. М.: ВЦ АН СССР, 1984.
10. *Агасандян Г.А., Ерешко Ф.И., Кукушкин Н.С., Меньшиков И.С., Меньшикова О.Р.* Разработка новых методов построения правил управления водохранилищами // *Резниковский А.М. и Рубинштейн М.И.* “Диспетчерские правила управления режимами водохранилищ”. М.: Энергоатомиздат, 1984. Гл. 5. С. 83–101.
11. *Агасандян Г.А.* Алгоритмы построения диспетчерских правил управления для каскадов водохранилищ // *Водные ресурсы*. 1985. № 5.
12. *Столярова Е.М.* Модели рыбных популяций. М.: ВЦ АН СССР, 1986.
13. *Гасанов И.И., Чебанюк Ю.М.* Многокритериальная стохастическая задача управления водохранилищем сезонного регулирования. В М.: ВЦ АН СССР, 1986.
14. *Кукушкин Н.С.* Аналитические модели оптимизации стратегии управления гидроэлектростанциями. М.: ВЦ АН СССР, 1986.
15. *Агасандян Г.А., Гасанов И.И., Меньшиков И.С., Чабан А.Н., Чебанюк Ю.М.* Методы расчета в задачах управления режимами водохранилищ // *Кибернетика и вычислительная техника*. № 3. М.: Наука, 1987.
16. *Кукушкин Н.С., Наврузов С.Т.* К проблеме рационального управления каскадом высокогорных гидроэлектростанций // *ДАН Тадж. ССР*. 1988. Т. 31, № 10. С. 641–643.
17. *Меньшиков И.С., Чабан А.Н.* Диспетчерские правила управления водохранилищем многолетнего регулирования. М.: ВЦ АН СССР, 1985. 46 с.
18. *Чабан А.Н.* Построение эффективных диспетчерских правил управления водохранилищем. М.: ВЦ АН СССР, 1986. 20 с.
19. *Наврузов С.Т., Чабан А.Н.* Диалоговая имитационная система управления каскадом водохранилищ. М.: ВЦ АН СССР, 1990. 31 с.

Был также осуществлен перевод книги “Системный подход к управлению водными ресурсами” / Под ред. А. Бисваса, перевод с англ. С.Б. Огневцева, А.Н. Чабана, Ю.М. Чебанюка под ред. Н.Н. Моисеева. М.: Наука, гл. ред. физ.-матем. лит.-ры, 1985. 392 с.

В начале 90-х гг. были начаты исследования в рамках Федеральной целевой программы “Возрождение Волги”, затем работа более плотно возобновилась в 1998 г. Работы велись совместно с ИВП РАН, Росгипроводхозом, Союзводпроектом. В 1999 г. сотрудников сектора пригласили принять участие в проекте ТАСИС по Оке. Результатом явились публикации по новым результатам.

1. *Агасандян Г.А.* Эколого-экономические аспекты моделирования водохозяйственных систем. М.: ВЦ АН СССР, 1994.
2. *Ерешко Ф.И., Пряжинская В.Г.* Концепция системы поддержки принятия водохозяйственных решений в бассейне р. Волги // Мелиорация и водное хозяйство. 1998. № 3. С. 11–13.
3. *Агасандян Г.А.* Программное обеспечение задачи управления каскадом водохранилищ (бассейн р. Волги). М.: ВЦ РАН, 2001.
4. *Агасандян Г.А., Гасанов И.И., Ерешко Ф.И.* Новые подходы в проблеме комплексного управления водными ресурсами ВЦ РАНМ. М.: ВЦ РАН, 2003.

**Агропромышленный комплекс.** В начале 80-х гг. большое количество проектов в СССР находили свое отражение в Международном институте прикладного системного анализа. Среди прочих был представлен и проект по сельскому хозяйству Ставропольского края. В реализации проекта у организаторов возникли определенные затруднения. Президент ВАСХНИЛ А.А. Никонов обратился за советом и помощью к Н.Н. Моисееву, и Никита Николаевич направил некоторые силы сектора на помощь коллегам из ВАСХНИЛ. Так образовался в ВЦ проект “Системный анализ в Ставропольском проекте”. Некоторые из прежних разработок удалось привить на новой почве в Институте Кибернетики ВАСХНИЛ. В секторе были проведены некоторые исследования по развитию общей модели размещения ресурсов, по теоретико-игровой модели рационального поведения центрального управляющего органа в агрохолдингах, по многоуровневой модели регулирования агропроизводства в децентрализованных экономических системах.

В этот период в основном сотрудники сектора занимались развитием теоретических конструкций, что нашло отражение в следующих публикациях. Например,

1. *Гасанов И.И., Рикун А.Д.* О необходимых и достаточных условиях одноэкстремальности в невыпуклых задачах математического программирования // ЖВМ и МФ. 1986. № 6.
2. *Кукушкин Н.С., Меньшиков И.С., Меньшикова О.Р., Моисеев Н.Н.* Об одном классе теоретико-игровых конструкций, представляющих интерес для экологии // ДАН СССР. 1986. Т. 287, № 5. С. 1044–1046.
3. *Кукушкин Н.С.* Устойчивость N-ядра в играх со структурированными функциями выигрыша // ДАН СССР. 1986. Т. 290. № 5. С. 1045–1047.
4. *Гасанов И.И.* Многокритериальная задача стохастического оптимального управления в дискретном времени. М.: ВЦ АН СССР, 1989.

В работе Ф.И. Ерешко “Системный анализ в Ставропольском проекте ведения сельского хозяйства” (Вестн. с.-х. науки. 1984. № 1. С. 40–49) была проведена декомпозиция общей модели описания аграрного производства на заданной территории и определены принципы разработки математического обеспечения для проектирования систем ведения сельскохозяйственных регионов.

В конце 80-х гг. в стране появились специфические заказы, и вследствие этих обстоятельств в ВЦ были переданы 35 единиц штатной численности, лимит численности по г. Москве и крупные договора.

Это послужило основанием для создания в 1989 г. отдела информационно-вычислительных систем ВЦ общей численностью 42 человека в составе четырех секторов:

- Сектор рационального использования природных ресурсов (зав. сектором Ф.И. Ерешко),
- Сектор моделирования природных систем (зав. сектором Г.А. Агасандян),
- Сектор принятия решений (зав. сектором Н.С. Кукушкин),
- Сектор вычислительных систем (зав. сектором С.А. Орловский).

Одной из задач отдела был

**Фрудоовощной проект** — преобразование плодоевощного комплекса г. Москвы.

С 1988–1992 гг. наш коллектив (вначале сектор, потом отдел) и группа проф. Ю.Н. Иванова из ВНИИСИ совместно с подразделениями Главмосплодоевощпрома разработали проект реформирования плодоевощного хозяйства г. Москвы. Сотрудники отдела принимали активное участие в создании необходимого методологического, математического, информационно-вычислительного и программного обеспечения деятельности вычислительных систем в управлениях и вычислительных центрах различных звеньев плодоевощного комплекса г. Москвы. Одним из значительных достижений данного проекта стала концепция реформирования, в которой предусматривался переход *от административной системы управления к регулируемому хозяйственному механизму*, основной характерной чертой которого является экономическая самостоятельность всех участников комплекса: магазинов, цехов, плодоевощных объединений, транспортных организаций, информационно-посреднической фирмы, поставщиков. В то же время предполагалось, что сохраняется регулирующая функция властных структур (регулирование цен, лицензирование деятельности, нормы торговли, городской заказ). Информационным проводником и посредником между городскими властями и независимыми экономическими агентами должна выступать Информационно-посредническая фирма, в функциях которой содержится подготовка и ведение договоров между участниками рынка, информирование властей о потоках продукции, введение отдельных учетных операций ОРПО (оптово-розничных плодоевощных объединений), прогноз развития рынка. В концепции были представлены:

- 1) описание системы плодоевощного снабжения Москвы до реформы (1990 г.),
- 2) результаты обследования и оценки организационных структур,
- 3) формулировка общих принципов реформы, предусматривающих экономическую самостоятельность, разветвленные правовые и экономические отношения, конкуренцию субъектов, государственный заказ,
- 4) описание субъектов реформируемой системы снабжения: покупатель, магазин, плодоевощная база, Мосзаготплодоевощ, перевозчики, Мосинформплодоевощ, плодоевощной банк, плодоевощная ассоциация.

Таким образом, исследованию подверглись естественные иерархии: центр (городские управления) и субъекты системы.

Вторым по значимости результатом проекта была система моделей для поддержки процессов принятия решения на различных уровнях иерархии управления плодоевощного комплекса г. Москвы и Московской области. В этих целях, в частности были созданы банки данных по г. Москве и Московской области, содержащие информацию по состоянию дел на экономических объектах этой отрасли (состав плодоевощных культур и площади под ними, размещение хозяйства областей и их специализация, размещение баз хранения, описание транспортных сетей, пунктов переработки, сетей реализации и т. д.); разработаны методы решения различного типа задач, возникающих в процессе прогноза, планирования и управления потоками продукции вне и внутри мегаполиса.

Наши усилия в основном были направлены на создание математического обеспечения для информационно-посреднической фирмы “Мосинформплодоевощ”. В ее функции входило: подбор поставщиков для заключения договоров, сопровождение договоров, подбор субъектов, осуществляющих хранение и транспортировку, подбор покупателей, согласование интересов и возможностей всех упомянутых субъектов.

Поскольку сельскохозяйственным предприятиям необходимы каналы сбыта своей продукции, то они заинтересованы в заблаговременном заключении соответствующих договоров. Таким образом, рыночная конъюнктура и директивное планирование обеспечивают высокий уровень спроса на услуги посреднической фирмы. При этом само положение посредника, заинтересованного в максимальной реализации его рекомендаций (в доходе фирмы существенную долю составляют комиссионные за заключенные при ее посредничестве договора), способствует тщательному учету интересов и пожеланий потенциальных партнеров по договорам и тем самым эффективности предлагаемых вариантов. Кроме того, в функциях Мосинформплодоевощ предусматривалось создание компьютерной сети для обслуживания системы не только в режиме прогнозирования и планирования, но и в режиме реального оперативного управления. Поэтому

для оценки текущего состояния плодоовощного снабжения г. Москвы были разработаны программные комплексы, которые позволяли получать “моментальные снимки” динамичного сектора городского хозяйства, отражая текущее состояние всех его компонентов — товара, путей его доставки, хранения, переработки, реализации. Повторные “снимки” через интервалы времени дают лицам, принимающим решения, возможность оценить динамику в состоянии снабжения и предпринять необходимые меры в рамках возможных полномочий. Такие “портреты” были созданы для системы снабжения из Московской области, т. е. описаны источники поставки плодоовощной продукции из ближайшего окружения г. Москвы, и для потребляющей части (“Портрет плодоовощного снабжения в г. Москве”). Появились соответствующие публикации:

1. Реформа плодоовощного комплекса г. Москвы, отчеты ВНИИСИ и ВЦ под ред. Ю.Н. Иванова. М., 1991.
2. А.Н. Ермолов, Кукушкин Н.С. Математические модели принятия посреднических решений. М.: ВЦ АН СССР, 1991.
3. Агасандян Г.А. Равновесие в системах производства, хранения и реализации сельхозпродукции. М.: ВЦ АН СССР, 1991.
4. Агасандян Г.А. Посредничество в рыночных системах. М.: ВЦ АН СССР, 1991.
5. Агасандян Г.А. Смешанные системы в производстве и реализации сельхозпродукции. М.: ВЦ АН СССР, 1993.
6. Ерешко Ф.И., Котельников В.А. Система поддержки принятия решений в информационно-посреднической фирме. М.: ВЦ РАН, 1997.
7. Ерешко Ф.И., Котельников В.А. Процедуры согласования интересов в проекте плодоовощного снабжения мегаполиса. М.: ВЦ РАН, 1997.

**Финансовая инженерия.** В начале 90-х гг. интерес сотрудников отдела привлекла финансовая тематика. Представлялось, что в поведении водных и финансовых потоков есть много общего: текучесть, ликвидность и т.д. Естественно, что и новые условия жизни в стране неуклонно подвигали к новой тематике. Заказы по водной тематике сокращались и постепенно перешли к разовым и краткосрочным. Только в 1998 г. возобновились работы на три года. По этой причине, а также постольку, поскольку финансовая тематика пронизывает все проекты, мы и обратились к новой проблеме — “битве за деньги”. В 1992 г. Ю.Н. Иванов пригласил на физтех проф. Дж. Маршалла из Сент-Джонского Университета штата Нью-Йорк для прочтения лекций по финансовой инженерии. Первое же впечатление, которое возникло у нас на лекциях и укрепилось в дальнейшем, — это глубокая системность подхода в финансовой инженерии, что особенно близко и понятно нам по образованию и опыту работы. Как неоднократно подчеркивалось проф. Дж. Маршаллом, команда финансовых инженеров состоит из юристов, бухгалтеров, макроэкономистов, специалистов в области налогообложения, математического моделирования и программирования и, естественно, лидера — основного носителя идей и замыслов проекта. Мы сразу же оценили большие перспективы финансовой инженерии для близкой нам сферы — моделирования и создания программных систем. Весь наш предшествующий опыт (будь то проектирование космических и оборонных систем или реформирование социально-экономических комплексов) показывал, что и в новой сфере — проектировании и создании новых финансовых инструментов — участие системных аналитиков, математиков и программистов будет столь же продуктивным. Мы вознамерились проделать в России тот же путь, что и наши коллеги в Америке, — пропагандировать идеи и методы финансовой инженерии, принимать участие в коммерческих и государственных проектах, в издании журнала “Финансовая инженерия” и создании российского филиала Международной ассоциации финансовых инженеров.

А вот как описывает свои впечатления от того периода Дж. Маршалл в предисловии к русскому изданию книги “Финансовая Инженерия”:

“В 1992 г. спустя всего лишь несколько месяцев после опубликования английской версии предлагаемой книги мне предоставилась возможность читать лекции в престижном Московском физико-техническом институте. Именно в это время зарождались современные российские рынки. Студенты и преподаватели, посещавшие мои лекции, были вне сомнения одними из самых интеллигентных и превосходно образованных людей, каких мне доводилось когда-либо встречать. Я почувствовал уверенность в том, что пройдет не слишком много времени, и российские финансовые рынки составят серьезную конкуренцию рынкам мировым.”

Весьма близко нам было и определение, данное Дж. Финнерти новой для нас научно-практической дисциплине: “Финансовая инженерия включает в себя проектирование, разработку и реализацию инновационных финансовых инструментов и процессов, а также творческий поиск новых подходов к решению проблем в области финансов”.

Как и прежде, необходимо было принять некий способ вхождения в новую тему. Поэтому наши первые шаги были направлены на обучение. Ранее мы имели возможность процесс обучения совмещать с практической работой, однако в данном случае в силу увлеченного дележа собственности возможными заказчиками и полного их подчинения моде приобретения программных продуктов на Западе мы использовали другую схему. Заключив контракты с проф. Р. Холтом из Вирджинского Университета США, мы выпустили на рынок три компьютерных учебника “Полный цикл финансового учета”, “Основы финансового менеджмента”, “Планирование инвестиций”, распространив более 20 тысяч экземпляров книг. К редактированию были привлечены известные ученые в своих областях. Так мы быстро вошли в тематику исследований. Ознакомившись с литературой, мы увидели, что ученые за рубежом придерживаются тех же системных взглядов, что и мы, так же, как и мы, используют те же приемы системного анализа (опыт МИПСА). Очень наглядно это выразила К. Рэй в переведенной Г.А. Агасандяном и Е.М. Столяровой книге “Рынок облигаций”: *“Новые продукты, новые участники и новые кризисы постоянно трансформируют рынок — слишком часто эвристические правила становятся просто “правилами”. Расчеты, проводимые трейдерами в процессе торговли, сродни военной медицине: они очень хороши в конкретных условиях, но отнюдь не универсальны. Прежде чем использовать результаты любого расчета, трейдер должен задаться вопросами: какие предпосылки неявно используются при данных вычислениях, не противоречат ли они предыдущим наблюдениям, будут ли они иметь силу в течение срока данной сделки. Трейдеры часто с помощью компьютерных программ определяют, является ли выпуск дорогим или дешевым, не понимая заложенных в программах предположений о динамике рынка. “Мусор на входе — мусор на выходе”. Однажды я спросила опытного опционного трейдера, какой совет он может дать будущим трейдерам. “Я всегда советую им углублять свои познания в философии или физике” — таков был ответ, шутливый лишь отчасти. Он имел в виду, что выдающийся трейдер должен и видеть картину в целом, и концентрироваться на деталях”*.

Мы перевели и продвинули на рынок книгу Дж. Маршалла и В. Бансала “Финансовая инженерия”, имевшую широкий успех среди академических ученых и практиков – финансистов. Полученные знания позволили нам в 1995–1997 гг. реализовать совместно с одним из инвесторов проект организации управления портфелем государственных долговых обязательств на базе специальной математической модели.

И.И. Гасанов, А.Ф. Ерешко. Об одном подходе к управлению портфелем государственных краткосрочных облигаций. М.: ВЦ РАН, 1997.

Мы установили тесный творческий контакт с кафедрой ценных бумаг и финансового инжиниринга Финансовой академии при Правительстве РФ (зав. кафедрой проф. Я.М. Миркин) и провели совместно в 2000 г. первую Всероссийскую конференцию по финансовой инженерии. (подробнее см. [www.ccas.ru](http://www.ccas.ru) раздел Объявления),]

Параллельно этому процессу группа наших сотрудников под руководством И.С. Меньшикова и О.Р. Меньшиковой, стартовав из отдела, создала проект FAST в Академии народного хозяйства — чрезвычайно насыщенную математическими моделями финансового рынка программу обучения финансистов-трейдеров, и этот проект — яркий пример использования математических моделей на финансовом рынке России.

Наше внимание особенно привлекла интересная и перспективная тема проектирования новых финансовых инструментов и генерирования финансовых схем.

К настоящему времени сотрудниками уже опубликовано достаточное количество работ по этой тематике у нас в стране и за рубежом. Как и раньше лидером выступает Г.А. Агасандян, им уже опубликовано по проблемам финансовой инженерии более 25 работ.

Примеры публикаций приводятся ниже.

**Г.А. Агасандян**

1. Финансовые потоки в динамической модели макроэкономики. М.: ВЦ РАН, 1998.
2. Финансовые пирамиды и проблема дефицита госбюджета // Рынок ценных бумаг. 2000. № 8
3. Финансовая инженерия и критерий допустимых потерь VaR. М.: ВЦ РАН, 2001.
4. Optimal Behavior of an Investor in Option Market, The 2002 IEEE World Congress on Computational Intelligence, International Joint Conference on Neural Networks. USA, Honolulu, Hawaii, May 12–17, 2002.
5. Описание поведения инвестора на многопериодном рынке опционов. М.: ВЦ РАН, 2003.
6. Принцип минимума дохода для инвестора рынка опционов. М.: ВЦ РАН, 2004.
7. Финансовая инженерия и континуальный критерий VaR на рынке опционов // Экономика и математические методы. 2005. № 3.

**И.И. Гасанов**

Опыт моделирования схемы организации торговли малыми пакетами акций на фондовом рынке. М.: ВЦ РАН, 2001.

**И.И. Гасанов, А.Ф. Ерешко**

Оптимальное управление портфелем дисконтных облигаций // Рынок ценных бумаг. 2001. № 12.

**Ф.И. Ерешко**

Моделирование рефлексивных стратегий в управляемых системах. М.: ВЦ РАН, 2001.

**Е.М. Столярова**

Дискретный прецедентный анализ поведения ГКО (Государственных краткосрочных облигаций). М.: ВЦ РАН, 2001.

**А.Ф. Ерешко**

Методы декомпозиции и локально-оптимальные стратегии в задачах управления портфелем ценных бумаг. М.: ВЦ РАН, 2002.

**Ф.И. Ерешко**

Системный анализ и финансовая инженерия // Тр. конф. "Современные сложные системы управления". Воронеж, 2003.

**Заключение**

Надо сказать, что в настоящее время рушатся многие иллюзии об организации науки. И пока можно только констатировать, что переход от *Административной системы управления к регулируемому хозяйственному механизму*, чем в отделе занимались в узкой области плодовоощного хозяйства, в полной мере реализован во всей стране, и удары хозяйственного механизма по отделу очень болезненны. Факты таковы.

В 1994–1996 гг. ликвидированы сектора Н.С. Кукушкина и С.А. Орловского.

В 2004 г. ликвидирован сектор Г.А. Агасандяна.

Численность отдела сократилась до 10 человек.

50 лет ВЦ РАН: история, люди, достижения

---

Подписано в печать 05.10.2005  
Формат бумаги 60×84 1/8  
Уч.-изд. л. 40,3. Усл.-печ. л. 40. Тираж 500 экз.

---

Отпечатано в ППП «Типография «Наука» Академиздатцентра РАН  
121099 Москва Г-99, Шубинский пер., 6  
Заказ № 1790