



Академия наук и атомная отрасль

Научные сессии Общего собрания членов РАН
и Общих собраний отделений РАН.
Декабрь 2020 г.

Под редакцией
академика РАН В.Г. Бондура,
академика РАН Г.Н. Рыкованова,
члена-корреспондента РАН А.А. Макоско



МОСКВА, 2021 г.



The Academy of Sciences and the Nuclear Industry

Scientific Sessions of the General Assembly of the RAS
and the General Assemblies of the RAS branches
December 2020

Edited by
academician of the RAS V.G. Bondur,
academician of the RAS G.N. Rykovanov and
correspondent member of the RAS A.A. Makosko



MOSCOW, 2021

УДК 539.1+54.0+553

ББК 31.4

А 38

Академия наук и атомная отрасль. Научные сессии Общего собрания членов РАН и Общих собраний отделений РАН. Декабрь 2020 г. – М.: Российская академия наук, 2021 / Под ред. академика РАН **В.Г. Бондура**, академика РАН **Г.Н. Рыкованова** и члена-корреспондента РАН **А.А. Макоско**.

Книга содержит материалы, подготовленные на основании докладов и выступлений, сделанных ведущими учеными страны на Научных сессиях Общего собрания членов РАН и Общих собраний отделений РАН. Они охватывают широкий спектр научных исследований и отражают научные достижения многих коллективов по атомной проблематике. Рассмотрены исторические аспекты зарождения, становления, развития атомной отрасли и роль Академии наук, а также ведущих отечественных ученых в этом процессе, начиная с реализации атомного проекта. Продемонстрирована актуальность исследований, связанных с реализацией как традиционных, так и новых направлений в области атомной науки, в том числе таких, как физика экстремального состояния вещества и высоких плотностей энергии, мощные лазеры, вычислительные и информационные технологии, новые материалы, двухкомпонентная ядерная энергетика и замыкание топливного цикла, корабельные и космические ядерные энергетические установки, проблемы радиохимии, радиобиологии и ядерной медицины, перспективы термоядерных исследований. Рассмотрены вопросы создания минерально-сырьевой базы и экономические аспекты развития атомной отрасли. Значительное внимание уделено вопросам глобальной стабильности в ядерном мире. Отмечена необходимость дальнейшего тесного сотрудничества Госкорпорации «Росатом» и Российской академии наук.

Книга предназначена для представителей органов государственной власти, профильных ведомств и организаций реального сектора экономики, а также для широкого круга специалистов, научных работников, профессорско-преподавательского состава, аспирантов и студентов старших курсов образовательных учреждений, специализирующихся в данных областях.

The Russian Academy of Sciences and the Nuclear Industry. Scientific Sessions of the General Assembly of the RAS and the General Assemblies of the RAS branches. December 2020. -

Moscow: Russian Academy of Sciences, 2021 / Ed. by academician of the RAS **V.G. Bondur** academician of the RAS **G.N. Rykovanov** and correspondent member of the RAS **A.A. Makosko**.

The book contains materials based on the reports and presentations made by leading Russian scientists during Scientific Sessions of the General Assembly of the Russian Academy of Sciences and General Assemblies of branches of the RAS. These materials cover a wide range of scientific research and reflect scientific achievements of many research teams on nuclear issues. The historical aspects of the origin, formation, and development of the nuclear industry and the role of the Academy of Sciences, as well as leading Russian scientists in this process, starting with the implementation of the atomic project, are considered here. The urgency of research related to the implementation of both conventional and new directions in the field of nuclear science is demonstrated, including extreme state of matter and high power density physics; high-power lasers; computational and information technologies; new materials; dual-component nuclear power industry and fuel cycle; naval and space nuclear power units; radiochemistry, radiobiology, and nuclear medicine industry issues; and thermonuclear research prospects. The issues of a mineral resource base creation and economic aspects of the nuclear industry development are considered. Much attention is paid to the challenges of global stability in the nuclear world. The need for further close cooperation between ROSATOM and the Russian Academy of Sciences is recognized.

The book is intended for representatives of government bodies, specialized agencies, and organizations of the real economy, as well as for a wide range of experts, researchers, teaching staff, graduate students, and senior students of educational institutions specializing in these areas.

ISBN 978-5-907366-28-2

© Российская академия наук, 2021

СО Д Е Р Ж А Н И Е

Приветствие Президента Российской Федерации В.В. Путина.....	7
Вступительное слово Президента РАН академика РАН А.М. Сергеева	8
Выступление генерального директора Госкорпорации «Росатом» А.Е. Лихачева	12
<i>Р.И. Илькаев, Л.Д. Рябев.</i> Академия наук и атомный проект в СССР	18
<u>В.Е. Фортв</u> , <i>Р.И. Илькаев, Г.Н. Рыкованов, В.Д. Селемир, Б.Ю. Шарков.</i> Взрывы, мощные ударные волны и экстремальные состояния вещества	37
<i>С.Г. Гаранин, С.В. Гарнов, А.М. Сергеев, Е.А. Хазанов.</i> Мощные лазеры для физики высоких плотностей энергии	62
<i>Е.О. Адамов, В.Г. Асмолов, Л.А. Большов, В.К. Иванов.</i> Двухкомпонентная ядерная энергетика	82
<i>Б.Ф. Мясоедов, С.Н. Калмыков, А.Ю. Шадрин.</i> Становление радиохимии как самостоятельной науки. Этапы развития радиохимии	95
<i>Е.П. Велихов, В.И. Ильгисонис.</i> Перспективы термоядерных исследований.	117
<i>Н.Н. Пономарев-Степной.</i> Атомно-водородная энергетика	134
<i>А.А. Саркисов.</i> Некоторые исторические уроки создания отечественной корабельной ядерной энергетики	164
<i>Ю.Г. Драгунов, Е.Л. Ромадова.</i> Космическая ядерная энергетика	197
<i>В.В. Петрунин.</i> Реакторные установки для атомных станций малой мощности	213
<i>С.Н. Лебедев, Б.Н. Четверушкин, Р.М. Шагалиев.</i> Вычислительные и информационные технологии в атомной отрасли	232
<i>А.В. Дуб, А.И. Рудской.</i> Новые материалы для ядерной энергетики	239
<i>В.В. Дремов.</i> Современные исследования плутония: от электронной структуры к «старению»	250
<i>И.Г. Тананаев, А.Ю. Цивадзе, Е.В. Захарова, И.А. Иванов.</i> Решение важнейших радиоэкологических проблем в Российской Федерации	265
<i>Н.С. Бортников, В.А. Петров, Г.А. Машковцев, И.Г. Печенкин.</i> Минерально-сырьевая база атомной отрасли	286
<i>А.Д. Каприн, В.П. Смирнов.</i> Ядерная медицина	307

<i>Л.А. Ильин, А.С. Самойлов.</i> Роль радиобиологии и радиационной медицины в обеспечении защиты от воздействия ионизирующих излучений (отечественный опыт)	323
<i>А.Г. Арбатов.</i> Глобальная стабильность в ядерном мире	341
<i>Ю.М. Батурин.</i> Когеренция физиков, ставших ядром советского атомного проекта.....	362
<i>А.А. Широ́в.</i> Оценка макроэкономических эффектов строительства объектов атомной энергетики	391
<i>Е.Т. Артемов.</i> Советский атомный проект в координатах «командной экономики»	401
Постановление Общего собрания членов Российской академии наук от 8.12.2020 г. № 35 «О научной сессии общего собрания членов РАН «75-летие атомной промышленности. Вклад Академии наук. Результаты и перспективы сотрудничества РАН и Госкорпорации «Росатом»	416

Приветствие Президента Российской Федерации В.В. Путина



ПРЕЗИДЕНТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

8 декабря 20 20 г.

№ Пр-2014

Москва, Кремль

Участникам общего собрания членов РАН

Уважаемые друзья!

Приветствую вас на общем собрании членов Российской академии наук, посвящённом 75-летию отечественной атомной отрасли.

Создание и становление атомной промышленности стало большим, по-настоящему значимым событием в истории нашей страны, которое во многом определило эффективное развитие науки, экономики, оборонно-промышленного комплекса, энергетики, здравоохранения. Оно способствовало достижению ракетно-ядерного паритета, обеспечению национальной безопасности государства. Отмечу, что столь выдающиеся успехи стали возможны благодаря таланту и творческому гению отцов-основателей атомного проекта академиков И.В. Курчатова, Ю.Б. Харитона, Я.Б. Зельдовича, А.Д. Сахарова, других прославленных учёных, их плодотворному, конструктивному взаимодействию со специалистами атомной отрасли.

Отрадно, что вы бережно храните трудовые традиции всех поколений предшественников, их уникальное интеллектуальное, научное наследие. Сегодня крайне важно активно участвовать в решении масштабных общенациональных задач, наращивать фундаментальные исследования по приоритетам научно-технологического развития страны.

Уверен, что нынешнее собрание пройдёт на достойном уровне, позволит вам обменяться позитивным опытом, наметить планы на будущее.

Желаю вам всего наилучшего.

В.Путин



Вступительное слово Президента РАН академика РАН А.М. Сергеева

Уважаемые участники и гости Общего собрания членов Российской академии наук!

Сегодня важное и для науки, и для всей страны событие – мы проводим научную сессию, посвященную юбилею атомной отрасли.

Атомная отрасль в нашей стране выросла из открытий и достижений фундаментальной науки в первой половине XX века, когда бурно развивалась квантовая механика, теория относительности, ядерная физика. И надо сказать, что творцы этой великой науки не представляли, насколько радикально их открытия изменят жизнь на планете. Известно, что Резерфорд, открывший атомное ядро, не осознавал в начале, для чего это открытие будет нужно.

Но всё в корне изменилось в конце 1938 года, когда была подготовлена статья двух немецких ученых Гана и Штрассмана, касающаяся эксперимента по делению урана при его бомбардировке медленными нейтронами. В эксперименте оказалось, что энергия вылетающих частиц гораздо больше той, которая приводила к делению атома урана. Эта энергия, как все, естественно, быстро поняли, берётся из разрыва внутриядерных связей. Так был экспериментально открыт новый источник колоссальной энергии. И сразу же впереди замаячили и новая энергетика, и новое оружие.

Еще задолго до этого события в питерском Радиевом институте и питерском Физико-техническом институте под руководством академика А.Ф. Иоффе велись работы по изучению атомного ядра. Они очень резко активизировались, когда в 1942 году вышло постановление Государственного Комитета Обороны, которое обязывало Академию наук и академика А.Ф. Иоффе организовать лабораторию по изучению атомного ядра. В 1943 году такая лаборатория была сформирована под знаменитым названием «Лаборатория № 2 Академии наук СССР». Руководителем лаборатории был назначен Игорь Васильевич Курчатов.

А в августе 1945 года после бомбардировки американцами двух японских городов вышло закрытое постановление Государственного Комитета Обороны о создании особого органа управления по развитию работ с целью создания атомной бомбы. Тогда Лаборатория № 2 была преобразована в мощную научную организацию, при которой в 1946 году было организовано КБ-11 (Саров). Сама Лаборатория № 2 в 1949 году была переименована в

Лабораторию измерительных приборов Академии наук СССР, а в 1955 году она стала Институтом атомной энергии Академии наук СССР. В настоящее время он широко известен как Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт».

Таким образом, имеем все основания утверждать, что Академия наук СССР была колыбелью атомной отрасли.

Академия наук не только обеспечивала формирование фундаментальных научных заделов, но и внесла огромный вклад в реализацию атомного проекта и развитие атомной отрасли через непосредственное участие своих членов в создании и руководстве подразделениями на ее объектах. Мы знаем великие имена Курчатова, Харитона, Тамма, Зельдовича, Сахарова, Боголюбова и других, и, конечно, это работа десятков академических институтов по программе атомной отрасли. Важно упомянуть, что из 9 участников атомного проекта – трижды Героев Социалистического Труда – 8 являлись членами Академии наук СССР; 9 членов Академии наук СССР, участвующих в атомном проекте, стали дважды Героями Социалистического Труда, а 51 ученый был удостоен звания Героя Социалистического Труда и Героя Труда Российской Федерации.

Взаимодействие Академии наук с атомной отраслью было исключительно плотным и плодотворным и в последующие годы, в какой бы организационной форме наша атомная отрасль ни существовала. В 1953 году был образован Минсредмаш, потом в 1992 году уже в российское время – Министерство по атомной энергии, затем Федеральное агентство по атомной энергии, а в 2007 году, наконец, Государственная корпорация «Росатом», с которой мы активно сотрудничаем в настоящее время.

Взаимодействие с Росатомом идёт сейчас по самым различным направлениям. Это, прежде всего, внедрение новых достижений фундаментальной науки в практические разработки атомной отрасли. И здесь можно привести ряд примеров.

Мы с вами знаем, что ускорительная тематика очень активно развивалась у нас, в том числе в Сибири в Институте ядерной физики. К началу 60-х годов были созданы ускорители, которые являлись продуктом фундаментальных экспериментальных исследований. После того как на них была достигнута достаточно высокая энергия, они оказались чрезвычайно востребованными нашей атомной отраслью для создания средств радиографии.

Для изучения быстро протекающих процессов в плотных веществах необходимо использовать жесткое рентгеновское излучение. В этом направлении отечественной наукой были получены важные результаты, которые затем использовались нашей атомной отраслью при решении важнейшей задачи – мониторинге процессов, связанных с развитием быстро протекающих ядерных реакций.

Еще один важный пример, который мы все знаем – это лазеры. В 1960 году был создан первый лазер (в 1964 году была вручена Нобелевская премия по этому направлению академиком Н.Г. Басову и А.М. Прохорову), и очень скоро это направление было подхвачено нашей атомной промышленностью. Появились предложения о том, как гигантская концентрация энергии в лазерном луче может быть использована для создания лазерного термояда. Впоследствии эти результаты привели к тому, что сейчас появилась возможность проведения очень серьезных работ в условиях полного запрета на ядерные испытания. Они позволяют использовать мощное лазерное излучение для того, чтобы осуществлять диагностику процессов, развивающихся в ядерных зарядах.

Аналогичные достижения, связанные с использованием результатов фундаментальной науки, есть и в других областях. Наверное, обязательно нужно отметить и радиохимию, и те достижения, которые наши химики продемонстрировали для выделения очень чистых изотопов. Это стало важным и в традиционных задачах, которые решает атомная отрасль, ну и в очень важных приложениях, скажем, в таких, как создание радиофармпрепаратов.

Когда мы говорим о взаимодействии Академии наук и академической науки в целом с атомной отраслью – это, конечно, взаимодействие не только институциональное, но это и взаимодействие между людьми. На персональном уровне выдающиеся ученые атомной отрасли избираются членами Российской академии наук, а в состав научных Советов РАН привлекаются много учёных атомной отрасли. С другой стороны, в Научно-техническом совете Росатома много членов Российской академии наук. Ну и здесь необходимо упомянуть имя академика Анатолия Петровича Александрова, именно как символ сотрудничества академической науки и атомной отрасли. Он долгие годы был Президентом Академии наук СССР и одновременно директором Института атомной энергии им. И.В. Курчатова.

Главное достижение нашей атомной отрасли – это то, что мы уже 75 лет живём в мире. Атомная промышленность обеспечила паритет в создании самых разрушительных вооружениях. Мы должны считать это главной заслугой нашей страны в развитии атомной отрасли.

Но время идет, и сейчас очень важным для всех нас является не только достижение военного паритета, которое есть, но и достижение научно-технологического паритета с ведущими странами – мировыми лидерами. Это – важнейшая задача. Если мы этот паритет не обеспечим, то окажемся просто на обочине развития нашей цивилизации. С этой точки зрения мы сейчас рассматриваем и нашу атомную отрасль, и взаимодействие Российской академии наук с атомной отраслью как возможность наращивания нашего потенциала в достижении такого научно-технологического паритета. Если мы действительно будем таким же образом дружно работать, мы этот паритет обеспечим, и я уверен, что для этого нам не надо будет ждать следующие 75 лет, – мы это всё сделаем вместе гораздо быстрее.

Приветствую всех участников и гостей Общего собрания членов РАН и желаю всем нам плодотворной работы!

Выступление генерального директора Госкорпорации «Росатом» А.Е. Лихачева

Дорогие друзья!

Сегодня одно из самых важных событий, которое мы проводим совместно с Академией наук в рамках празднования 75-летия атомной промышленности.

В каком-то смысле мы пришли в свою колыбель. Именно отсюда благодаря труду великих российских ученых выросла атомная промышленность. Сегодня мы не только определяем текущую повестку дня нашего сотрудничества, а в большинстве докладов услышим реальные конкретные направления взаимодействия Госкорпорации «Росатом» и Российской академии наук и ее институтов, но и, самое главное – мы определим дальнейшую повестку взаимодействия и дальнейшего сотрудничества ещё, как минимум, на 75 лет вперед.

Хотел бы добавить несколько слов к исторической части доклада Президента Российской академии наук. Совершенно очевидно, что всё, чем сегодня гордится страна, чем гордится атомная отрасль, создано благодаря научному заделу советских ученых. Именно они создали тот базис, который позволил решить проблемы защиты суверенитета Советского Союза, Российской Федерации и обеспечить лидирующее положение неоружейных технологий на глобальном рынке.

Конечно же, мы не могли обойти вниманием труд и сегодняшних руководителей, сегодняшних лидеров Академии наук, руководителей научных школ и научных направлений. Свыше 50 членов Академии, академиков и членов-корреспондентов, занимающихся атомной тематикой, отмечены юбилейной медалью «75 лет атомной промышленности Российской Федерации». Как сказал уже Александр Михайлович, мы в ходе сегодняшнего заседания будем знакомить со списком награждённых и в начале своего выступления хотел бы в первую очередь поблагодарить весь состав Академии наук, институтов за совместную многолетнюю работу и пожелать здоровья, счастья, новых научных свершений, стойкости, негибамости духа, несмотря на все сложности, которые есть сегодня в нашей жизни. Спасибо большое за совместную работу!

Уважаемые коллеги! Начало системным работам по радиологии в нашей стране было положено исследованиями Владимира Ивановича Вернадского и

созданием в 1922 году Радиевого института. В 1937 году был построен первый в Европе циклотрон. Протонно-нейтронная модель ядра, открытие спонтанного деления урана и явление ядерной изомерии, работы по искусственному расщеплению ядер, эффект Вавилова-Черенкова и другие значительные достижения советских ученых способствовали тому, что в канун Великой Отечественной войны в стране благодаря советским ученым появился масштабный ядерный задел.

Работы по урану в военной сфере тоже появились в Академии наук, когда в 1943 году была организована Лаборатория № 2, ныне всемирно известный Курчатовский институт. Члены Академии наук внесли решающий вклад в обеспечение ядерного паритета, создание ракетно-ядерного щита и безопасности страны. Курчатов, Харитон, Зельдович, Сахаров, Щелкин, Забабахин работали над ядерным оружием. Королев, Келдыш, Туполев, Ильюшин, Яковлев, Челомей создали ракетную технику и реактивную авиацию. С рождением атомного подводного и атомного ледокольного флота навсегда связаны имена Александра, Доллежала, Хлопкина.

Из 9 участников атомного проекта, трижды удостоенных звания Героя Социалистического Труда, 8 являлись членами Академии наук СССР. Это Курчатов, Харитон, Александров, Келдыш, Духов, Зельдович, Сахаров, Щелкин. Великой заслугой советских ученых, прежде всего, Игоря Васильевича Курчатова, было умение подняться выше исключительно военного характера использования атомных технологий. Решая задачи безопасности страны, они одновременно смогли в буквальном смысле заглянуть в будущее, стали на шаг впереди всего мира и нашли возможности для мирного использования атомной энергии. Курчатов, Блохинцев, Доллежал стали создателями первой в мире атомной станции в Обнинске, которая была введена в строй в 1954 году. Все великие достижения в Минсредмаше, оборонном ядерном потенциале и атомной энергетике, уранодобыче и атомном ледокольном флоте осуществлялись в тесном сотрудничестве с Академией наук.

Мы, конечно, не можем не вспомнить Ефима Павловича Славского. Он всегда чрезвычайно бережно и уважительно относился к ученым, отвергал командные методы в науке и лично вмешивался в конфликты, если таковые случались между руководством отрасли и учеными. Ну и всем, конечно, известна его фраза, наполненная особой гордостью: «В нашем Министерстве

своя Академия наук», имея в виду, что в отрасли всегда работает несколько десятков академиков и членов-корреспондентов.

Шестидесятые-семидесятые годы прошлого столетия справедливо называют расцветом советской атомной отрасли. В 1964 году был запущен первый реактор ВВЭР-210 на Нововоронежской станции. Значение этого блока для атомной энергетики трудно переоценить. Технология ВВЭР дала 6 моделей энергоблоков с реакторами разной мощности и, конечно же, ставшие знаменитыми на весь мир, ВВЭР-1200 поколения «3+» – главный экспортный продукт Росатома на современном этапе.

В конце пятидесятых годов начались масштабные исследования в области термоядерной энергии. В результате была создана целая серия Токамаков, а это слово устойчиво вошло во все мировые научные глоссарии. Параллельно шли разработки по быстрой реакторной тематике, которые увенчались запуском первого реактора БН-350 в Актау в 1973 году. Благодаря сотрудничеству с научными центрами и институтами Академии наук отечественная атомная отрасль стала одним из мировых лидеров в области проектирования и строительства энергетических исследовательских реакторов, обогатительных технологий и создания ядерного топлива.

Мощный импульс развитию отрасли, а значит, и укреплению связей с Академией и с академической наукой дало историческое решение Президента страны о создании в 2007 году государственной корпорации «Росатом» для управления атомными активами.

С первых дней существования Росатома науке, научной деятельности уделяется огромное значение. Сейчас российские физики из Институты Росатома, Курчатовского института, Российской академии наук, Объединенного института ядерных исследований и ведущих университетов страны участвуют в крупнейших международных проектах ИТЭР (ITER) и ФАИР (FAIR). В сотрудничестве с академическим Институтом проблем безопасности развития атомной энергетики реализована программа повышения надежности эксплуатации атомных станций. Совместно с Курчатовским институтом выполнена ФЦП ядерной радиационной безопасности номер один и сняты с повестки дня острейшие вопросы наследия, такие как разгрузка пристанционных хранилищ ОЯТ, озеро Карачай, Теченский Каскад, создана технология приведения в безопасное состояние уран-графитовых реакторов.

Ведущие академики осуществляют научное руководство ключевыми направлениями Росатома: академик Николай Николаевич Пономарев-Степной ведёт тему атомной водородной энергетики; академик Валентин Пантелеймонович Смирнов развивает технологии ядерной медицины и осуществляет научное руководство Высшей школой физики, в которой реализуются математические курсы для талантливых молодых ученых; академик Георгий Николаевич Рыкованов является председателем Научно-технического совета Росатома. Все они, а также академики Радий Иванович Илькаев, Александр Юрьевич Румянцев входят в состав Отраслевого комитета по науке, который во многом определяет приоритетные направления научно-технологического развития отрасли и конкретные работы. Не могу не отметить буквально неоценимый вклад Льва Дмитриевича Рябева и Юрия Алексеевича Трутнева в поддержание ядерного щита нашей страны.

Сейчас перед Росатомом стоят новые масштабные задачи. Большая их часть нашла свое отражение в Комплексной программе развития техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии. Указ о создании такой программы подписан Президентом страны. Фактически это четырнадцатый Национальный проект не только по масштабу и содержанию, но и по форме и управлению. К его реализации, в том числе и по направлениям управляемого термоядерного синтеза, водородной энергетики, разработки новых материалов, будут привлечены ученые Российской академии наук и ее институтов, наших базовых вузов и многие другие организации. Только сообща можно обеспечить научный и технологический прогресс в этих областях. Подробности о проектах, составляющих эту комплексную программу, мы услышим сегодня в тематических докладах участников нашего собрания. Но хотел бы подчеркнуть, что, конечно, сердцем в ядре этой программы является развитие атомной энергетики в ее двухкомпонентном формате и замыкание топливного цикла. Вдохновитель и научный руководитель этого проекта Евгений Олегович Адамов участвует в нашей научной сессии.

Дорогие друзья! Мы хорошо понимаем важность фундаментальной науки, которая на современном этапе может являться весьма ресурсоемкой. Поэтому мы сознательно включили ряд фундаментальных вопросов, таких, например, как синтез сверхтяжелых элементов, физика высоких плотностей энергии, исторически исследуемых при участии наших атомщиков, в состав

Комплексной программы. При этом, несмотря на преимущественную ориентацию программы на проведение прикладных исследований и разработок, мы действительно озабочены вопросами фундаментальных исследований, проводимых нашими учеными, понимаем, что из работ в области фундаментальной физики возможен выход в новые энергетические и сопутствующие технологии.

Ну и, конечно же, не могу не поделиться с вами самой важной новостью этого года: во время визита в Саров Президент Российской Федерации одобрил нашу инициативу о создании на базе РФЯЦ-ВНИИЭФ Национального центра физики и математики, об открытии там филиала МГУ им. М.В. Ломоносова. Мы понимаем эту работу как создание Академгородка нового типа, своеобразной Долины знаний за пределами физической защиты собственно Федерального ядерного центра Саров. Конечно же, мы планируем проводить эту работу в прямом взаимодействии с Российской академией наук, Курчатовским институтом, МГУ и Правительством Российской Федерации. Считаем, что этот центр станет не только своеобразной меккой российских атомщиков, но и точкой притяжения ученых, молодых специалистов из ВУЗов, а также образовательных центров всей нашей страны.

Нельзя не отметить, что мы нуждаемся в серьезной поддержке Академии наук и по нашим новым направлениям. Это: цифровые продукты, развитие искусственного интеллекта, квантовых технологий, большой технологический проект по новым материалам и веществам. Это, конечно же, работа по лазерной тематике.

Впереди ещё совсем пока новое для нас направление и его реализация – работа по экологическому национальному проекту. Приведу лишь один пример. Нам нужна совместная экспертиза по выбору технологии нейтрализации накопленного наследия в Иркутской области в Усолье-Сибирском и особенно на Байкальском целлюлозно-бумажном комбинате, поскольку накопленные отходы находятся в непосредственной близости от уникального заповедного озера Байкал. Да и вообще, вся работа, которую мы сейчас ведем в области экологии, нуждается в серьезной профессиональной экспертизе Академии наук.

Буквально на днях мы обсуждали создание научного центра, посвященного развитию Арктики. Там тоже перед нами стоят важные задачи, сопоставимые по своей значимости с содержанием ядерного оружейного

комплекса и развитием энергетики. Работа в этом экологически хрупком регионе может быть эффективно проведена только при соответствующей серьезной научной оценке.

Такова большая амбициозная повестка, которую мы принимаем сегодня и которая встанет, на мой взгляд, существенно более широко завтра. Спасибо за то, что мы собрались сегодня вместе для того, чтобы обсудить её и наметить дальнейшие пути нашего сотрудничества. Уверен, что наше заседание станет импульсом не просто к повышению уровня нашей работы, но откроет новые, пока еще невиданные нам горизонты совместной кооперации.

Спасибо большое за работу! Счастья, здоровья, дальнейших успехов и многолетнего успешного совместного труда!

Р.И. Илькаев¹, Л.Д. Рябев²

АКАДЕМИЯ НАУК И АТОМНЫЙ ПРОЕКТ В СССР

Во время потсдамской конференции на встрече руководителей СССР, США и Великобритании (рис. 1) 24 июля 1945 года президент США Трумэн сообщил Сталину, что у США «теперь есть оружие необыкновенной разрушительной силы». После этого сообщения руководство нашей страны приняло решение о реализации Атомного проекта в СССР.

Это событие состоялось еще до того, как Хиросима подверглась бомбардировке урановым зарядом на пушечном сближении, а Нагасаки плутониевым зарядом со сферической имплозией.



Рис. 1. Июль 1945 г. Потсдам.
Руководители СССР, США и Великобритании:
И. Сталин, Г. Трумэн и У. Черчилль

О существовании атомного проекта в США Сталину доложили еще в начале 1942 года. После этого он подписал распоряжение об организации в СССР работ по урану. Но работа по урану в нашей стране началась гораздо

¹ Почетный научный руководитель РФЯЦ-ВНИИЭФ, академик РАН.

² Заместитель директора РФЯЦ-ВНИИЭФ.

раньше и имеет богатую историю и знаменитые научные и технологические достижения.

Выдающиеся достижения Атомного проекта были основаны на прочном фундаменте развития отечественной науки, заложенном еще в 20–30-е годы XX века. Они определялись высоким уровнем советских исследований в области физики, среди которых:

- развитие теории атомного ядра;
- открытие ядерных изомеров и спонтанного деления урана;
- создание первого в Европе циклотрона;
- проведение пяти Всесоюзных и международных конференций по ядерной физике;
- создание сети физических, в том числе физико-технических, институтов во многих городах страны;
- развитие физики процессов детонации взрывчатых веществ.

Советские физики уже перед войной имели ряд первоклассных научных центров в Москве, Ленинграде, Харькове и добились выдающихся результатов:

- в 1918 г. был основан Рентгенологический и радиологический институт,
- в 1922-м – Радиевый институт,
- в 1923-м – Ленинградский физико-технический институт,
- в 1928-м – Харьковский физико-технический институт,
- в 1931-м – Институт химической физики и Институт редких металлов,
- в 1932-м – Физический институт им. П.Н. Лебедева,
- в 1934-м – Институт физических проблем.

Наконец,

- в 1938 г. в АН СССР была образована Комиссия по атомному ядру, а в 1940 г. – Комиссия по проблемам урана, в состав которой входили Н.Н. Семенов, И.В. Курчатов, Ю.Б. Харитон.

В 1940 году А.Ф. Иоффе предсказал, кто станет научно-техническими лидерами Атомного проекта СССР. В записке в Президиум АН СССР от 24 августа 1940 года А.Ф. Иоффе отметил, что *«возможность технического использования энергии урана нельзя считать исключенной при настоящем состоянии наших знаний... основными специалистами, к которым, прежде всего, следует обратиться, являются: И.В. Курчатов и его сотрудники*

Флеров и Петржак (ЛФТИ), Зельдович и Харитон (ЛИХФ)... Общее руководство всей проблемы в целом следовало бы поручить И.В. Курчатову как лучшему знатоку вопроса, показавшему на строительстве циклотрона выдающиеся организационные способности».

Руководство страны сформулировало основные задачи Академии наук на тот период (рис. 2).

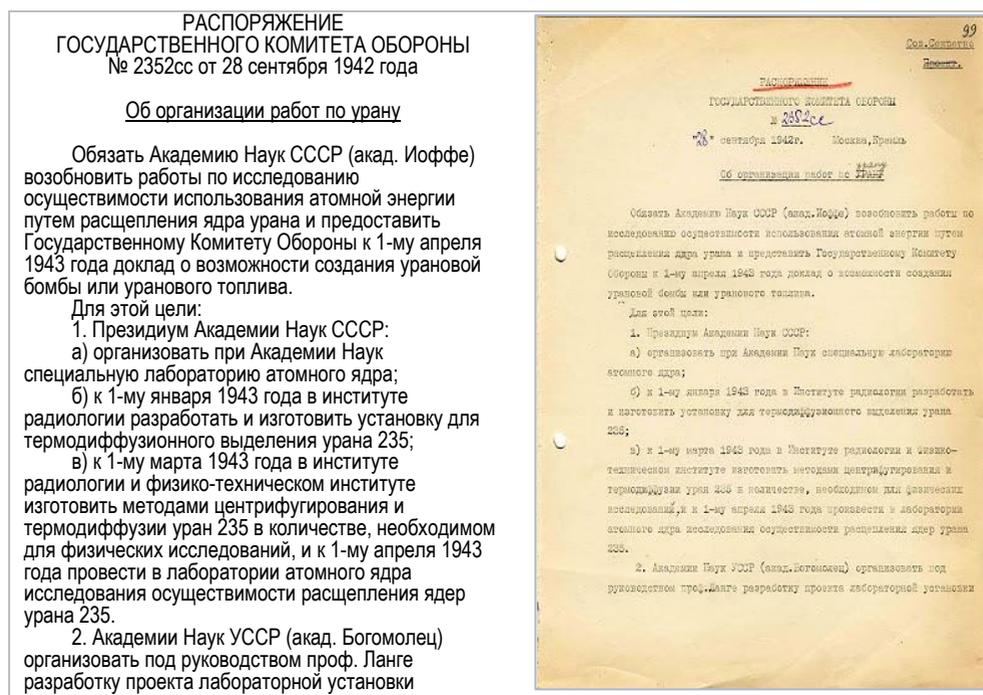


Рис. 2. Основные задачи Академии наук в организации работ по урану

Одним из организаторов физических исследований в СССР являлся академик А.Ф. Иоффе (рис. 3). Отметим его участие в реализации Атомного проекта.

Абрам Федорович Иоффе (академик с 1920 года, Герой Социалистического Труда) был активным участником первых стадий Атомного проекта, членом технического совета Спецкомитета, создателем и директором Ленинградского физико-технического института (ЛФТИ), ставшего базовой организацией для образования сети физико-технических институтов АН СССР (в том числе Института химической физики, Харьковского физико-технического института). Он был инициатором развертывания работ в различных областях

физики. К его школе относится ряд выдающихся руководителей Атомного проекта: академики И.В. Курчатов, Ю.Б. Харитон, Н.Н. Семенов, И.К. Кикоин, А.П. Александров, А.И. Алиханов, Л.А. Арцимович, А.И. Лейпунский.

Ю.Б. Харитон писал об А.Ф. Иоффе *«У Абрама Федоровича была вера в могущество физики... Очень много идей рассыпал он вокруг себя... Иоффе глубоко понимал, что ядерная физика – это тот раздел физики, который не может не дать выхода».*



Рис. 3. Один из организаторов физических исследований в СССР академик А.Ф. Иоффе со своими учениками академиками А.И. Алихановым и И.В. Курчатовым в лаборатории ЛФТИ (1935 год)

11 февраля 1943 года было принято постановление ГКО о начале практических работ по созданию атомной бомбы. Общее руководство было возложено на заместителя председателя ГКО В.М. Молотова, который, в свою очередь, назначил главой атомного проекта И.В. Курчатова.

12 апреля 1943 года вице-президентом АН СССР академиком А.А. Байковым было подписано распоряжение о создании Лаборатории № 2 АН СССР. Начальником Лаборатории был назначен И.В. Курчатов.

20 августа 1945 года председатель Государственного комитета обороны СССР И.В. Сталин подписал постановление о создании Специального комитета при ГКО – особого органа управления работами по урану, состоящего из высших государственных деятелей и ученых-физиков (рис. 4).

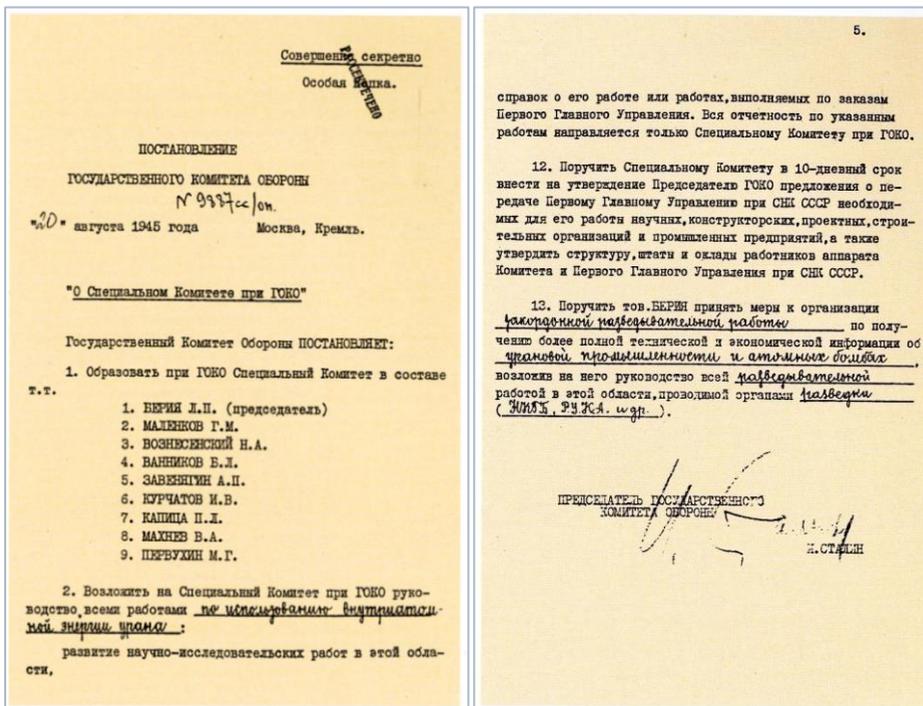
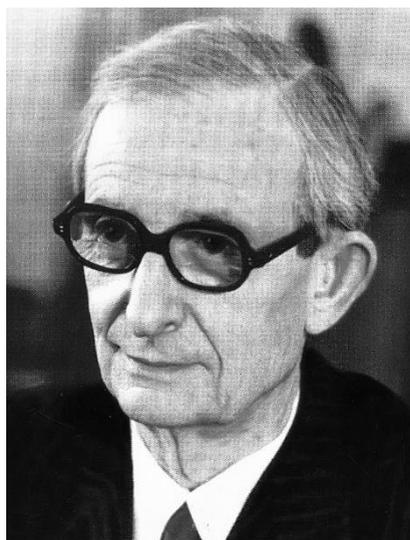


Рис. 4. Постановление Государственного комитета обороны



а)



б)

Рис. 5. Руководители КБ-11:
Харитон Юлий Борисович (а); Зернов Павел Михайлович (б)

Считается, что с этой даты Российская атомная отрасль ведет отсчет своей истории.

9 апреля 1946 года постановлением СМ СССР было создано КБ № 11 при Лаборатории № 2 АН СССР по разработке конструкции и изготовлению опытных образцов атомных бомб на границе Горьковской области и Мордовской АССР (теперь г. Саров, ранее известный как Арзамас-16).

Начальником КБ-11 был назначен П.М. Зернов, а главным конструктором – Ю.Б. Харитон (рис. 5).

Отметим основные элементы Атомного проекта:

- решение сложнейших научно-технических задач по разработке первой советской атомной бомбы РДС-1;
- созданию технологий получения ключевых ядерных материалов;
- создание новой атомной промышленности;
- создание ядерного оружейного центра;
- создание полигона для ядерных испытаний;
- создание системы кооперации предприятий, организаций, институтов Академии наук, направленной на достижение общей цели – реализацию Атомного проекта;
- развитие фундаментальных и прикладных исследований в новых областях;
- форсированная подготовка специалистов нового поколения в ВУЗах, развитие научных школ, руководители которых показаны на рис. 6.

Перечислим принципиальные особенности Атомного проекта СССР, среди которых новые знания, новые технологии, новые производства:

новые знания:

- ядерная физика;
- физика взрыва и гидродинамика высоких плотностей энергии;
- радиохимия;
- специальное материаловедение;

новые технологии:

- ядерный реактор;
- выделение плутония из облученного ядерного топлива;
- газодиффузионное и электромагнитное разделение изотопов;

новые производства:

- предприятия по добыче и переработке урана;
- комбинат по производству плутония;
- комбинаты по производству высокообогащенного урана.



Ю.Б. Харитон



Я.Б. Зельдович



И.Е. Тамм



А.Д. Сахаров



Н.Н. Боголюбов



М.А. Лаврентьев



Г.Н. Флеров



Д.А. Франк-Каменецкий

Рис. 6. Руководители научных школ КБ-11 (ВНИИЭФ)
начала 50-х годов XX века

Огромную положительную роль в создании атомной бомбы сыграла разведка. Поражает масштаб и эффективность работы наших разведчиков. По атомной проблеме было передано более 10 000 страниц текста, техническая документация, чертежи и даже образцы материалов (уран, бериллий). Информация поступала из Великобритании, Канады, США.

Послевоенная военно-политическая ситуация в мире была крайне напряженной, особенно в условиях монополии США на ядерное оружие.

В 1949 году в США работало 4 промышленных ядерных реактора по наработке оружейного плутония, причем два из них были пущены в конце 1944 года, а один – в начале 1945 года. К концу 1949 года на этих реакторах было наработано около 700 кг оружейного плутония, в том числе к концу 1945 года – около 120 кг. СССР к концу 1949 года вряд ли располагал количеством плутония, заметно превышающим 10 кг.

В 1949 году США уже располагали ядерным арсеналом, состоящим из 170 ядерных зарядов общим энерговыделением в 4,2 Мт. Среднее энерговыделение одного ядерного заряда составляло при этом около 25 кт.

По существу, весь боезапас США к 1949 году был основан на физической схеме плутониевого ядерного заряда на принципе имплозии.

Стратегическая авиация рассматривалась в качестве средства доставки ядерного оружия на территорию СССР, а для расширения ее боевых возможностей вдоль границ СССР интенсивно развертывались военные базы.

Эти факты с очевидностью указывали на жизненную необходимость работ по ликвидации атомной монополии США. Эта монополия была ликвидирована 29 августа 1949 года.

Ученые Академии наук на ключевых позициях Атомного проекта

Кроме институтов АН СССР, в Постановлении Правительства перечислены еще 10 институтов, входящих в состав различных наркоматов.

В целях предварительной подготовки предложений по координированию исследовательской работы вновь привлекаемых организаций Технический совет рекомендовал создать при совете 3 постоянные комиссии, а именно:

Комиссию по вопросам изучения ионного метода под председательством академика А.Ф. Иоффе в составе:

- академика А.А. Лебедева (Государственный оптический институт),
- профессора С.А. Векшинского (Лаборатория НКЭП),
- профессора Л.А. Арцимовича (Лаборатория №2).

2. Комиссию по вопросам получения тяжелой воды под председательством академика П.Л. Капицы в составе:

- профессора М.О. Корнфельда (Лаборатория №2 АН СССР),
- профессора В.Н. Каргина (Институт им. Карпова Наркомхимпрома),
- профессора А.Г. Касаткина (Наркомхимпром),
- инженера Л.С. Генина (ГСПИ-3 Наркомхимпрома),
- Г.И. Гаврилова (Государственный НИИ-42 Наркомхимпрома).

3. Комиссию по изучению плутония (председатель академик В.Г. Хлопин из Радиевого института АН СССР, заместитель председателя член-корреспондент АН СССР Б.А. Никитин) в составе:

- кандидата физических наук Б.В. Курчатова (Лаборатория N 2),
- академика И.И. Черняева (Институт неорганической химии АН СССР).

К работам привлекались сотрудники многих институтов:

- Физико-технического института Академии наук СССР (директор – академик А.Ф. Иоффе) – Д.Г. Алхазов, Е.Ф. Гросс, С.Е. Бреслер, А.П. Александров;
- Физического института Академии наук СССР (директор – академик С.И. Вавилов) – И.М. Франк, Е.Л. Фейнберг, Л.В. Грошев, Д.В. Скобельцын, В.И. Векслер;
- Радиевого института Академии наук СССР (директор - академик В.Г. Хлопин) – Б.А. Никитин, А.П. Ратнер, А.А. Гринберг, К.Д. Петржак, М.Г. Мещеряков, А.П. Жданов;
- Института физической химии Академии наук СССР (директор – академик Л.Н. Фрумкин);
- Института неорганической химии Академии наук СССР (директор – академик И.И. Черняев);
- Института химической физики Академии наук СССР (директор – академик Н.Н. Семенов);
- Уральского филиала Академии наук СССР (председатель филиала академик И.П. Бардин) – Ф.Ф. Ланге;
- Биогеохимической лаборатории Академии наук СССР (директор – член-корреспондент А.П. Виноградов);
- Физического института Украинской академии наук (руководитель – академик Украинской академии наук А.И. Лейпунский) – Н.Д. Моргулис;
- Физико-технического института Украинской академии наук (директор – профессор К.Д. Синельников) – А.К. Вальтер.

Ключевым вопросом в создании атомной бомбы являлось получение уранового сырья. На необходимость развития уранодобывающей промышленности в СССР указывала еще в довоенное время Урановая комиссия, в состав которой входили выдающиеся геохимики академики В.И. Вернадский и А.Е. Ферсман.

30 июля 1943 года было выпущено распоряжение ГКО об организации геологоразведочных работ и добычи урана, проведение которых было поручено Комитету по делам геологии при СНК СССР. В начале 1946 года И.В. Курчатов писал: «До мая 1945 года не было надежд осуществить уран-

графитовый котел, так как в нашем распоряжении было только 7 тонн окиси урана и не было надежды, что нужные 100 тонн урана будут выработаны ранее 1948 года...».

К 1949 году ресурс добытого природного урана, которым располагал СССР, составлял 25% от ресурса США. При этом около 73% природного урана СССР было получено из-за рубежа, в основном из Германии и Чехословакии. Мощности уранодобывающей промышленности постепенно подтягивались к мощностям США: уже в 1949 году поступление природного урана в СССР составляло 86% от его поступления в том же году в США.

В итоге десятилетней деятельности крупных коллективов геологов, геофизиков и других специалистов в целом в СССР и странах Восточной Европы было открыто, разведано и передано в эксплуатацию более 50 месторождений урана с общими запасами 84000 тонн. Таким образом, устойчивая база для развития Атомного проекта была успешно создана.

Получение плутония является главным технологическим этапом создания первой атомной бомбы. В 1946 году в Курчатовском институте был запущен первый атомный реактор Ф-1 (рис. 7). После чего приступили к созданию промышленного реактора на Урале.



Рис. 7. Атомный реактор Ф-1, пущенный И. В. Курчатовым
25 декабря 1946 года

Приведем основные этапы создания промышленного реактора-наработчика плутония:

– 1 декабря 1945 г. – Постановление СНК СССР о создании Комбината №817 (сейчас – ПО «Маяк»), научный руководитель создания реактора «А» (рис. 8) – И.В. Курчатов, главный конструктор – Н.А. Доллежал;

– 19 июня 1948 года под руководством И.В. Курчатова был начат запуск реактора «А» с нулевой отметки;

– 22 декабря 1948 года состоялся пуск завода «Б» для радиохимического выделения плутония, содержащегося в ОЯТ реактора «А»; радиохимические процессы для завода «Б» были разработаны в Радиевом институте под руководством В.Г. Хлопина;

– в августе 1949 года на заводе «В» были изготовлены полусферы из металлического плутония для РДС-1; технология получения чистого металлического плутония была разработана в НИИ-9 под руководством А.А. Бочвара, научного руководителя завода «В».

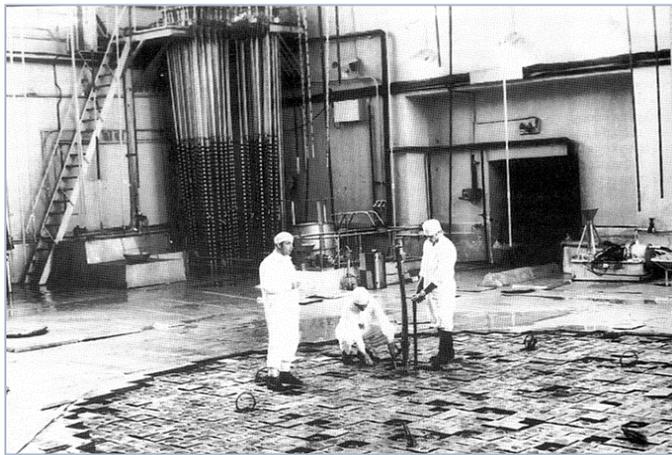


Рис. 8. Центральный зал реактора «А»

Приведем основные итоги создания РДС-1, которые, кроме решения основной задачи, способствовали модернизации страны:

- развитие вычислительной математики;
- создание базы для развития атомной энергетики и ядерных силовых установок;
- создание основ физики высоких плотностей энергии, включая средства диагностики взрывных процессов;
- развитие ускорительной техники и физики атомного ядра;

- развитие радиохимии и физико-химии для получения высокочистых и специальных материалов;
- создание радиационной биологии.

Создание РДС-1 являлось не только демонстрацией выдающихся возможностей советской науки, техники и промышленности, но и стало точкой отсчета для промышленного производства атомного оружия.

3 марта 1949 года Постановление СМ СССР предписывало, что сборочный завод, основанный в КБ-11, будет выпускать 20 бомб типа РДС-1 в год.

К 1953 году международная обстановка была напряженной, так как США имели в 10 раз больше атомных зарядов и более 1800 бомбардировщиков для их доставки. Кроме того, в США уже были достигнуты крупные успехи в создании термоядерного оружия большой мощности. Необходимо было срочно создавать отечественное термоядерное оружие.

Первые образцы термоядерного оружия были созданы в СССР и США практически одновременно и имели принципиально отличные конфигурации термоядерных узлов. От идеи атомного обжаривания до испытания как в США, так и в СССР прошло примерно 1 год 8 мес. Эти сроки составили с 09.03.1951 до 01.11.1952 в США и с 01.03.1954 до 22.11.1955 года в СССР.

На первом этапе Атомного проекта эффективно действовала Ленинградская школа физиков, на втором (термоядерном) этапе – Московская школа физиков с молодым лидером А.Д. Сахаровым. В 1953 году была успешно испытана сахаровская слойка, в 1955 году был реализован принцип радиационной имплозии.

Таким образом, Советский Союз справился с задачей по созданию принципиальных научных основ разработки атомного и термоядерного оружия. Возникла очень трудная, как в экономическом, так и в научно-техническом плане, задача достижения паритета с США.

После того как были установлены первые исходные физические закономерности, используемые при разработке атомного и термоядерного оружия, началось 35-летнее соперничество двух великих держав в создании всех видов ядерных вооружений. Наша страна отвечала на вызовы, инициатором которых, по существу, гонки вооружений, были США. Но ответ СССР был своевременным и адекватным. Это было и с морской компонентой стратегических сил, и с разделяющимися боеголовками для тех же целей, и с нейтронными зарядами для тактических вооружений и др.

В этой очень сложной и напряженной работе кроме ВНИИЭФ участвовали РФЯЦ-ВНИИТФ им. ак. Е.И. Забабахина, ВНИИА им. Н.Л. Духова, которые были организованы в 1955-м и в 1954 годах соответственно, а также все организации атомной промышленности, состоящей из 10 закрытых административно-территориальных образований (ЗАТО).

Создание в СССР термоядерного оружия явилось переломным моментом в середине XX века, которое сделало третью мировую войну невозможной.

Создание ядерного оружия в нашей стране обеспечило глобальный мир во второй половине XX – начале XXI столетий.

Фотографии физиков, участников Атомного проекта – лауреатов Нобелевской премии, приведены на рис.9. На рис. 10 приведены фотографии участников Атомного проекта, ставших Трижды Героями Социалистического труда.



Рис. 9. Участники разработки первых образцов термоядерного оружия – лауреаты Нобелевской премии



Рис. 10. Трижды Герои Социалистического Труда
– участники Атомного проекта

Физики – участники термоядерного проекта – первыми поняли, что они создали оружие Сдерживания и донесли эту точку зрения до руководителей страны. В 1954–1956 гг. политики трансформировали это положение в тезис о мирном сосуществовании.

В середине 50-х годов численность армии была уменьшена с 5763000 человек в 1955 году и до 3623000 человек в 1958 году.

Уроки Атомного проекта:

- во-первых, это урок целенаправленной рациональной организации всех работ по атомной проблеме;
- во-вторых, это урок того, как надо привлекать всю интеллектуальную мощь страны для выполнения государственной задачи;
- в-третьих, это пример того, как необходимо реагировать на прорыв в научной сфере, имеющий колоссальное оборонное значение;
- в-четвертых, это был первый пример создания оружия сдерживания, основанного на самых передовых технологиях, определяемых достижениями фундаментальной науки, пример, которому должна следовать наша оборонная доктрина в XXI веке.

Оружие сдерживания в полном объеме было создано и развернуто. Крупный военный конфликт с нашей страной стал невозможным. Это вклад атомной отрасли и Академии наук в обеспечение мира на планете в течение 75 лет.

Поскольку и в настоящее время ядерное оружие является основой военной безопасности России, то оборонные работы по обеспечению ядерного сдерживания являются приоритетными.

В этой области есть широкое поле деятельности Росатома и РАН по примеру сотрудничества Академии наук СССР и атомной отрасли при реализации Атомного проекта.

В условиях действия Договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний (ДВЗЯИ) мы должны гораздо больше знать о физических процессах, происходящих в ядерных зарядах. Необходимо модернизировать все физические модели, используемые в расчетно-теоретических работах по обоснованию надежности, безопасности и эффективности ядерного оружия.

Центр тяжести работ по надежности и безопасности, таким образом, переносится в научные лаборатории и математические центры с мощной вычислительной базой. Поэтому создание и поддержание на мировом уровне экспериментальной и вычислительной базы является первоочередной задачей.

По важности и многомерности современные задачи по модернизации ядерного оружия сравнимы с теми задачами, которые решались при реализации Атомного проекта СССР.

В настоящее время в Росатоме функционируют несколько научных центров мирового уровня. Среди них:

- 1) Центры физики высоких плотностей энергии;
- 2) Центры по созданию прикладного математического обеспечения;
- 3) Тритиевый центр;
- 4) Лазерный центр;
- 5) Центр ускорителей частиц;
- 6) Радиохимический центр;
- 7) Облучательный центр;
- 8) Центр электромагнитных излучений.

Необходимо сформировать совместную Программу работ Росатома и Российской академии наук с государственным финансированием по оборонным направлениям через Росатом, а по фундаментальной физике через

Правительство Российской Федерации. Это будет новым государственным проектом России в интересах развития науки и обеспечения безопасности государства, реализация которого является зоной ответственности Росатома и РАН, которые должны обеспечить качество результатов работ на мировом уровне.

Проблемными вопросами обеспечения конкурентоспособности ядерного оборонного комплекса в XXI веке являются:

- создание и развитие принципиально новой экспериментальной, испытательной вычислительной базы, позволяющей проводить исследования, гарантирующие безопасность и надежность нашего ядерного арсенала до конца XXI века;

- обеспечение надежности, безопасности и эффективности существенно более широкой номенклатуры ЯЗ и ЯБП по сравнению с США, для обеспечения решения задач: регионального ядерного сдерживания; преодоления развернутой ПРО; повышения эффективности Вооруженных сил на ТВД в условиях асимметрии неядерных средств и вооружений и др.;

- обеспечение эффективности ЯЗ и ЯБП в условиях ответного и ответно-встречного удара для нанесения неприемлемого ущерба агрессору;

- обеспечение кадровой преемственности в уникальных знаниях, технологиях и методах в условиях относительного ослабления отечественной науки и образования, «утечки» лучших выпускников.

В сегодняшних условиях турбулентности мировых процессов, малой численности населения России (146 млн), наличия огромной территории (17 млн км²), ограниченности мировых ресурсов ядерное оружие является гарантом национальной безопасности Российской Федерации, эффективным средством предотвращения масштабных военных угроз государству.

На рис. 11 приведены сравнительные военно-экономические показатели Российской Федерации и НАТО.

Анализ данных, приведенных на этом рисунке, показывает, что в краткосрочной и среднесрочной перспективах у России нет альтернатив ядерному оружию, как эффективному средству сдерживания возможной военной агрессии.

Важнейшие компоненты национальной безопасности в XXI веке – военно-техническая и экономическая безопасность – определяются уровнем научно-технического развития государства. А научно-техническое развитие

государства определяется состоянием фундаментальной и прикладной науки и образования. В условиях отставания простое заимствование передовых технологий невозможно, так как, во-первых, они содержат «секреты» («ноу-хау»), а во-вторых, для их воспроизводства необходимы компетенции (знания и специалисты), в целом соответствующие передовому мировому уровню.

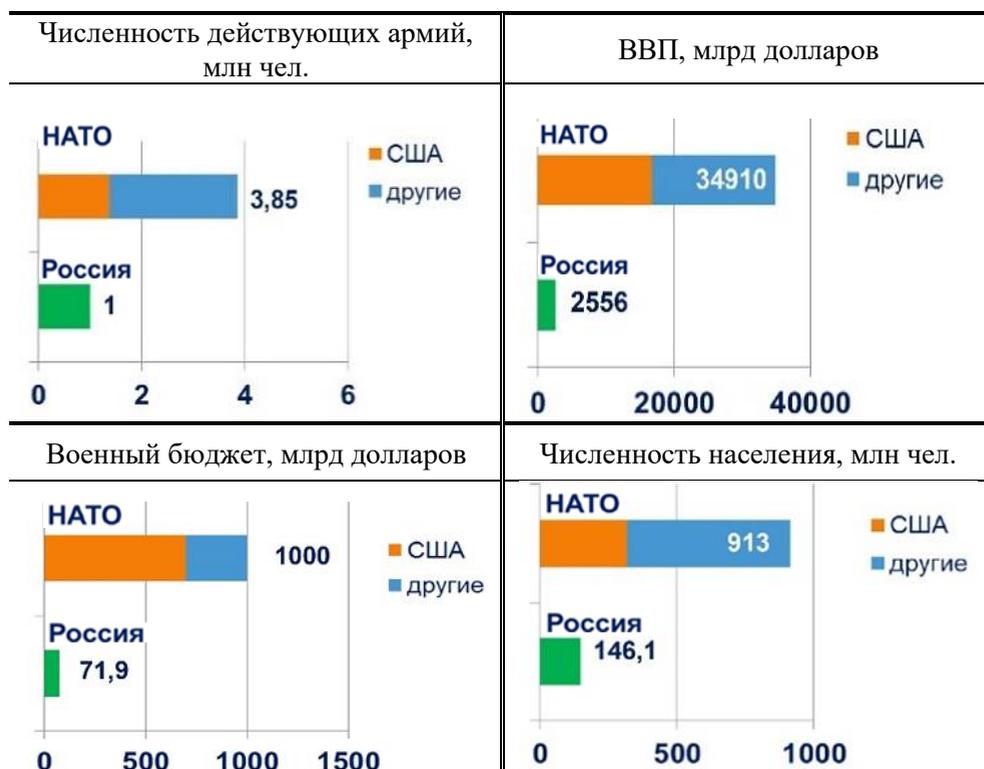


Рис. 11. Сравнительные военно-экономические показатели РФ и НАТО

В связи с этим современное развитие требует высокопрофессиональных специалистов, наличие которых определяется уровнем образования и общественными приоритетами в трудовой деятельности.

В ядерной отрасли России сконцентрированы талант и знания нескольких поколений выдающихся ученых и инженеров. Поэтому естественно, что этот интеллект в полной мере должен послужить России в это трудное для нее время.

XX век был бурным и неоднозначным, но это был великий век. Он закончился, но не заканчиваются ни жизнь людей, ни их научный поиск, ни их

надежды. И на извечный вопрос: «Как же обрести желаемое?», Ю.Б. Харитон спокойно и просто отвечал: «трудясь...»

Высочайший профессионализм, героизм труда выдающихся создателей ядерного оружия и значимость их дел для обеспечения безопасности страны вписаны в историю Отечества. Они являются замечательным примером новым поколениям, как в труднейших условиях эффективно решать важнейшие национальные проблемы.

Заключение

Отмечая 75-летие Атомной отрасли, необходимо указать, что она начала создаваться сразу после Великой Победы, которую одержала наша страна в войне, по существу, со всей Европой, после Победы, **равной которой нет в мировой истории**. И сразу же после этого возник новый вызов, связанный с созданием в США атомной бомбы, в разработке которой приняли участие лучшие ученые мира. Этот вызов был принят нашей страной. Был реализован Атомный проект и была создана отечественная атомная бомба. **Наша страна стала сверхдержавой**. Впервые в истории длится такой продолжительный 75-летний период без крупных военных конфликтов.

В этом историческом событии имеется существенный вклад атомной отрасли и Академии наук, их институтов и производственных предприятий.

История 75-летнего периода развития атомной промышленности показала, что для нашей страны посильны решения самых сложных задач глобального уровня. **Для этого необходимы только разумная концентрация интеллектуальных, трудовых и экономических ресурсов, политическая воля и единство всего общества. Все остальное у нас есть: и опыт, и традиции, и кадры, и ресурсы.**

Литература

1. Атомный проект СССР: Документы и материалы /Под общ. ред. Л.Д. Рябева. – Т. I. Атомная бомба. 1938–1945. Ч. 1 / Отв. сост. Л.И. Кудинова. – М.: Наука, Физматлит, 1998. – 432 с.
2. Атомный проект СССР: Документы и материалы /Под общ. ред. Л.Д. Рябева. – В 3 т. – Т. II. Атомная бомба. 1945–1954. Кн. 6 / Отв. сост. Г. А. Гончаров. – М.-Саров: Наука, Физматлит, 2004. – 896 с.
3. Атомный проект СССР: Документы и материалы /Под общ. ред. Л.Д. Рябева. – В 3 т. – Т. II. Атомная бомба. 1945–1954. Кн. 1 / Отв. сост. Г.А. Гончаров. – М.: Наука, Физматлит, 1999. – 734 с.

4. Андриюшин И.А., Илькаев Р.И., Чернышев А.К. «Решающий шаг к миру. Водородная бомба с атомным обжатием РДС-37». – Саров, РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2010. – 132 с.
5. Mikhailov V., Andryushin I., Chernyshev A. Catalog of worldwide nuclear testing. – New York, NY: Begell-Atom, 1999. –129 с.
6. Атомный проект СССР: Документы и материалы /Под общ. ред. Л.Д. Рябева. – В 3 т. – Т. III. Водородная бомба. 1945–1956. Кн. 1 / Отв. сост. Г.А. Гончаров. – М.-Саров: Наука, Физматлит, 2008. – 736 с.
7. Атомный проект СССР: Документы и материалы / Под общ. ред. Л.Д. Рябева. – В 3 т. – Т. III. Водородная бомба. 1945–1956. Кн. 2 / Отв. сост. Г.А. Гончаров. – М.: Наука, Физматлит, 2009. – 600 с.
8. Андриюшин И.А., Илькаев Р.И., Чернышев А.К. «Слойка» Сахарова. Путь Гения. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2011. – 203 с.
9. Илькаев Р.И., Андриюшин И.А., Чернышев А.К. Игорь Васильевич Курчатов. Основатель атомной отрасли. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2015. – 173 с
10. Илькаев Р.И., Андриюшин И.А., Чернышев А.К. Яков Борисович Зельдович в атомном проекте. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2014. – 151 с
11. Илькаев Р.И., Андриюшин И.А., Чернышев А.К. Юлий Борисович Харитон. Страницы творческой биографии. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2014. – 283 с.

В.Е. Фортгов, **Р.И. Илькаев**¹, **Г.Н. Рыкованов**², **В.Д. Селемир**³,
Б.Ю. Шарков⁴

ВЗРЫВЫ, МОЩНЫЕ УДАРНЫЕ ВОЛНЫ И ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ СОСТОЯНИЯ ВЕЩЕСТВА

В начале XX века бурными темпами стали развиваться исследования строения атома и атомного ядра. Опираясь на достижения в этой области ряда ведущих физиков мира, И.В. Курчатов, Я.Б. Зельдович и Ю.Б. Харитон уже в 1939 г. обосновали возможность протекания в уране цепной реакции деления ядер, а следовательно – возможность практического использования принципиально нового ядерного источника энергии, в миллионы раз более мощного, чем традиционные химические реакции.

Вскоре после этого были сформулированы условия [1, 2] реализации цепной ядерной реакции взрывного типа (открытой ранее академиком Н.Н. Семеновым для химических реакций) с выделением беспрецедентно большого количества энергии. Это означало, что ученые подошли к порогу создания оружия необычайно разрушительной силы [2, 3].

В середине XX века развитие физики высоких плотностей энергии получило мощный импульс в связи с вхождением нашей цивилизации в атомную и космическую эры, прежде всего, с первым шагом в этом направлении – созданием ядерного и термоядерного оружия [2, 3–7].

В ядерных зарядах высокие плотности энергии, порождаемые мощными ударными волнами, используются для инициирования цепных ядерных реакций в сжатом ядерном топливе, а в термоядерных зарядах высокоэнергетические состояния являются основным инструментом для сжатия, разогрева термоядерного топлива и инициации в нем термоядерных реакций синтеза.

Работа ядерных устройств с квазиконтролируемым (атомные и водородные заряды) и с контролируемым (инерционный управляемый термоядерный синтез) энерговыделением основана на инициировании

¹ Почетный научный руководитель РФЯЦ-ВНИИЭФ, академик РАН.

² Научный руководитель РФЯЦ-ВНИИТФ им. ак. Е.И. Забабахина, академик РАН.

³ Директор Научно-производственного центра физики РФЯЦ-ВНИИЭФ, член-корреспондент РАН.

⁴ Вице-директор ОИЯИ, академик РАН.

ядерных реакций синтеза в смеси дейтерия и трития в сильно сжатом и разогретом ядерном топливе.

Огромный вклад в развитие науки об экстремальном состоянии вещества на первом этапе внесли выдающиеся отечественные ученые академики Я.Б. Зельдович, А.Д. Сахаров, Ю.Б. Харитон, Е.И. Забабахин, А.И. Павловский, С.Б. Кормер, Л.В.Альтшулер и др. Начатые ими в середине пятидесятых годов исследования в рамках ядерных оборонных проектов СССР к настоящему времени получили значительное развитие с появлением новых устройств генерации высоких плотностей энергии, таких как лазеры, пучки заряженных частиц, сильноточные Z-пинчи, взрывные, электровзрывные генераторы мощных ударных волн, многоступенчатые легкогазовые пушки и алмазные наковальни. Эти сложные и дорогостоящие технические устройства позволили существенно продвинуться по шкале доступных для физического эксперимента концентраций энергии и получить в лабораторных или квазилабораторных условиях состояния мега- и гигабарного диапазонов давлений, недостижимых для традиционной техники физического эксперимента.

Кроме того, устойчивым прагматическим стимулом таких исследований явилось практическое применение состояний с высокими концентрациями энергии в ядерной, термоядерной и импульсной энергетике, электрофизике высоких напряжений и мощностей для синтеза сверхтвердых веществ, для упрочнения и сварки материалов, для противометеоритной защиты космических аппаратов и, конечно, для обороны страны.

В настоящее время физика высоких плотностей энергии превратилась в обширный и быстро развивающийся раздел современной науки, где применяются самые передовые средства генерации, методы диагностики и компьютерного моделирования на наиболее мощных суперкомпьютерах.

Традиционно под «высокими» принято [3, 8, 9] считать концентрации энергии в веществе, превышающие $10^4 - 10^5$ Дж/см³, что соответствует энергии связи валентных электронов (в несколько электронвольт) и давлениям примерно от 100 кбар до 1 Мбар. Эти давления значительно превосходят пределы механической прочности веществ и делают необходимым учет их сжимаемости при гидродинамическом движении в результате импульсного энерговыделения.

Состояние вещества с предельно высокими температурами и давлениями, а следовательно, с экстремально высокими концентрациями энергии, всегда привлекало исследователей перспективами получения в лабораториях

условных экзотических состояний, из которых возникла наша Вселенная в результате Большого взрыва и в которых находится сейчас подавляющая (90 – 95 %) масса барионного (видимого) вещества – в звездных и межзвездных объектах, в планетах и экзопланетах [10].

Как правило, вещество в условиях высоких плотностей энергии находится в плазменном (ионизованном) состоянии, так как в нем происходят процессы термической ионизации и/или ионизации давлением. В астрофизических объектах такое сжатие и разогрев осуществляется гравитационными силами и ядерными реакциями, а в лабораторных условиях – мощными ударными волнами, для возбуждения которых применяется широкий набор «драйверов» – от двухступенчатых газовых пушек до лазеров и сильноточечных Z-пинчей мощностью сотни тераватт [3, 10].

При этом если в астрофизических объектах время существования экстремальных состояний вещества варьируется от миллисекунд до миллиардов лет, позволяя проводить их подробное наблюдение и измерение при помощи космических зондов, орбитальных и наземных телескопов различных длин волн, то в земных условиях речь идет о микро-, фемто-, аттосекундном диапазонах длительностей [3, 11], что требует применения специфических предельно быстрых средств диагностики.

Важно отметить, что в экспериментах с лабораторной плазмой экстремальных состояний уже сейчас удастся в малом масштабе частично воспроизвести многие явления и процессы, происходящие в астрофизических объектах, информация о которых стала доступна в результате применения земных и космических наблюдательных средств. Это сведения о гидродинамическом перемешивании и разнообразных неустойчивостях, ударноволновых явлениях, сильноизлучающих, релятивистских и замагниченных потоках и струях, солитонах, релятивистских явлениях, уравнениях состояния, составе и спектрах сжатой неидеальной плазмы, а также характеристики межзвездной космической плазмы, пыли и ряда иных явлений.

1. Фазовая диаграмма материи в экстремальном состоянии

Возникновение экстремальных состояний в природе вызвано силами тяготения, носящими дальнего действия и, в отличие от кулоновских (в электромагнитной плазме), неэкранируемый характер. Эти силы сжимают и разогревают вещество либо непосредственно, либо стимулируя экзотермические ядерные реакции в массивных астрофизических объектах и на ранних этапах эволюции Вселенной [9, 12].

Эффекты релятивизма электронов в уравнении состояния и транспортных свойств плазмы, когда

$$m_e c^2 \approx kT,$$

соответствуют температуре

$$T \approx 0,5 \text{ МэВ} \approx 6 \times 10^6 \text{ К.}$$

Выше этой температуры вещество становится неустойчивым по отношению к спонтанному рождению электрон-позитронных пар.

Квантовые эффекты определяются параметром вырождения

$$n\lambda^3,$$

где $\lambda = \sqrt{\hbar^2 / 2mkT}$ – тепловая дебройлевская длина волны.

Для вырожденной плазмы $n\lambda^3 \gg 1$ масштабом кинетической энергии является энергия Ферми

$$E_F \approx \hbar^2 n^{2/3} / 2m,$$

которая растет с ростом плотности плазмы, делая ее по мере сжатия, $n \rightarrow \infty$ все более идеальной:

$$\Gamma = mc^2 / (\hbar^2 n^{1/3}) \rightarrow 0.$$

Условие релятивизма, соответствующее условию $mc^2 \approx E_F \approx 0,5 \text{ МэВ}$, дает плотность $\rho \approx 10^6 \text{ г/см}^3$.

Масштабы реализуемых в природе экстремальных состояний способны поразить самое смелое воображение (рис. 1):

на дне Марианской впадины (глубина 11 км) давление воды достигает 1,2 кбар;

в центре Земли – $P = 3,4 \text{ Мбар}$, $T \approx 0,5 \text{ эВ}$, плотность $\rho \approx 10 - 20 \text{ г/см}^3$;

в центре Юпитера – $P \approx 40-70 \text{ Мбар}$, $T \approx 2 \cdot 10^4 \text{ К}$, $\rho \approx 30 \text{ г/см}^3$;

в центре Солнца – $P \approx 240 \text{ Гбар}$, $T \approx 1,6 \cdot 10^3 \text{ эВ}$, $\rho \approx 150 \text{ г/см}^3$;

в остывающих звездах – белых карликах – $P \approx 10^{10}-10^{16} \text{ Мбар}$, $T \approx 10^3 \text{ эВ}$, $\rho \approx 10^6-10^9 \text{ г/см}^3$.

В мишенях управляемого термоядерного синтеза с инерционным удержанием плазмы $P \sim 200 \text{ Гбар}$, $T \sim 10^8 \text{ эВ}$, $\rho \approx 150-200 \text{ г/см}^3$.

Нейтронные звезды, являющиеся элементами пульсаров, магнитаров, источниками γ -всплесков, имеют, по-видимому, рекордно высокие параметры:

$P \approx 10^{19} \text{ Мбар}$, $T \approx 10^4 \text{ эВ}$, $\rho \approx 10^{11} \text{ г/см}^3$ для мантии;

$P \approx 10^{23} \text{ Мбар}$, $T \approx 10^4 \text{ эВ}$, $\rho \approx 10^{14} \text{ г/см}^3$ для ядра

при гигантской величине индукции магнитного поля $10^{11}-10^{16} \text{ Гс}$.

При столкновениях тяжелых ядер, разогнанных в современных ускорителях до релятивистских скоростей, возникают состояния сверхсжатой кварк-глюонной плазмы с ультраэкстремальными параметрами:

$P \approx 10^{30}$ бар, $T \approx 10^{14}$ К, $\rho \approx 10^{15}$ - 10^{16} г/см³, превосходящими условия, реализуемые в экстремальных астрофизических объектах [10].

2. Методы генерации высоких плотностей энергии в веществе

Современные экспериментальные возможности хотя и быстро прогрессируют, но способны лишь частично вторгнуться в область ультраэкстремальных астрофизических состояний. Прочность вещества принципиально ограничивает применение статических методов исследования высоких плотностей энергии, так как подавляющее большинство конструкционных материалов неспособно выдержать интересующие экспериментаторов высокие давления. Исключение составляет алмаз – рекордсмен по твердости ($\sigma_n \approx 500$ кбар), что позволяет, используя его в алмазных наковальнях, достигать в статических опытах давлений 3–5 Мбар [10].

Пальма первенства принадлежит сейчас динамическим методам [3, 8, 14, 15], основанным на импульсной кумуляции высоких плотностей энергии в веществе. Время жизни таких высокоэнергетических состояний определяется временем инерционного разлета плазмы, имеющего характерный масштаб 10^{-10} – 10^{-6} с. Это требует применения средств диагностики с высоким временным разрешением.

Использование ударных волн, генерируемых источниками высоких локальных плотностей энергии, позволяет резко расширить диапазон доступных для эксперимента давлений и температур, проникнув в область параметров, промежуточную между параметрами химических ВВ и уникальными условиями в подземных ядерных взрывах.

Уже в первых экспериментах с лазерными, пучковыми и электродинамическими ударными волнами удалось получить важные экспериментальные данные об уравнении состояния водорода, дейтерия, меди, железа, углерода и воды и использовать их для анализа строения планет-гигантов Солнечной системы и экзопланет [3, 8, 11].

Спектр экспериментальных устройств для генерации высоких плотностей энергии весьма многообразен. Он включает алмазные наковальни для

статического сжатия вещества, пороховые и легкогазовые метательные устройства – «пушки», взрывные генераторы мощных ударных волн, электровзрывные устройства, магнитокумулятивные генераторы, лазеры, сильноточные генераторы мощных импульсов электрического тока, ускорители заряженных частиц и возможные комбинации этих устройств.

В табл. 1. приведено сопоставление параметров наиболее мощных из действующих и строящихся типов установок [10]: лазеры, импульсные электротехнические устройства, Z-пинчи, ускорители заряженных частиц [10, 11]. Ускорители релятивистских заряженных частиц (электронов и ионов), созданные для проведения плазменных исследований в интересах обороны и физики высоких энергий, в настоящее время с успехом применяются и для работ в области фундаментальной физики плазмы высоких плотностей энергии.

3. Ударно-волновые динамические методы

Продвижение по шкале высоких плотностей энергии связано с переходом к динамическим методам исследований [8, 9, 15, 16], основанным на импульсной кумуляции энергии в исследуемом веществе при помощи мощных ударных волн либо при помощи электромагнитного или корпускулярного излучения различной природы. Возникающие при этом температуры и давления плазмы значительно превосходят термостойкие пределы конструкционных материалов установок, что приводит к ограничениям характерного времени жизни плазмы в динамических экспериментах, которое определяется динамикой разлета мишени и составляет примерно 10^{-10} – 10^{-5} с.

При динамическом подходе отсутствуют принципиальные ограничения на величину создаваемых в мишени максимальных плотностей энергии и давления, они лимитируются только мощностью энергетического источника – «драйвера».

Наиболее распространенным инструментом создания высоких плотностей энергии являются мощные ударные волны [3, 14, 15], возникающие в результате нелинейных гидродинамических явлений в веществе при его движении, вызванном импульсным энерговыделением. Основную роль здесь играет ударная волна – вязкий скачок уплотнения, в котором кинетическая энергия набегающего потока преобразуется в тепловую энергию сжатой и необратимо разогретой плазмы.

Источники энергии и экспериментальные устройства, применяемые в физике высоких концентраций энергии [1, 2]

Первичный источник энергии	Конечная форма источника энергии	Плотность энергии, МДж/см ³	Температура, эВ	Давление, 10 ⁵ Па	Полная энергия, МДж	Длительность, с	Мощность, Вт
Химические ВВ	Химические ВВ	10 ⁻²	0,5	5 · 10 ⁵	10 ²	10 ⁻⁷	10 ¹⁰
	Металлические пластины	0,3	60	10 ⁷	3	10 ⁻⁶	10 ¹⁰
	Магнитное поле 1 МЭ	4 · 10 ⁻³	0,3	5 · 10 ⁴	5	10 ⁻⁶	5 · 10 ¹²
	Магнитное поле 25 МЭ	2,5	200	2,5 · 10 ⁷	1	10 ⁻⁷	10 ¹³
	Взрывные генераторы плазмы	10 ⁻²	60	10 ⁵	30	10 ⁻⁶	10 ¹²
Ядерные ВВ	Ядерные ВВ	10 ⁴	10 ⁷	10 ¹⁰	10 ¹¹	10 ⁻⁶	10 ²²
	Нейтронный нагрев	10	50	2 · 10 ⁷	10 ³	10 ⁻⁶	10 ¹⁵
	Ударные волны в твердом теле	5	50	5 · 10 ⁷	10 ⁴	3 · 10 ⁻⁶	10 ¹⁵
	Ударные волны в газе	0,3	40	2 · 10 ⁵	10 ⁷	10 ⁻⁵	10 ¹⁸
	Адиабатическое сжатие	2 · 10 ⁻⁵	0,3	150	10 ³	6 · 10 ⁻³	10 ⁵
Сжатый газ	Ударные трубы пневматические	10 ⁻⁴	1	250	10 ⁻²	10 ⁻⁴	3 · 10 ⁸
	Ударные трубы на горении	10 ⁻⁶	2	10	2 · 10 ⁻²	3 · 10 ⁻⁴	10 ⁸
	Ударные трубы, электрический разряд	10 ⁻⁷	2	1	10 ⁻²	10 ⁴	10 ⁸

Ударно-волновая техника эксперимента играет сегодня ведущую роль в физике высоких плотностей энергии, позволяя получать для многих химических элементов и соединений максимальные давления мегабарного и гигабарного диапазонов. Достигнутый к настоящему времени диапазон максимальных динамических давлений на шесть порядков превосходит давления при ударе пули, на три порядка – давление в центре Земли и оказывается близким к давлению в центральных слоях Солнца и мишенях инерционного термоядерного синтеза [9, 16]. Такие экзотические состояния вещества возникали при рождении нашей Вселенной спустя несколько секунд после Большого взрыва [9, 10].

В определенном смысле можно считать, что, последовательно увеличивая давление и температуру в динамических экспериментах, мы как бы двигаемся вспять по оси времени, приближаясь к моменту рождения Вселенной – Большому взрыву (см. рис. 2).

Ударная волна не только сжимает, но и разогревает вещество до высоких температур, что особенно важно для получения плазмы – ионизованного состояния материи. При экспериментальном изучении сильнонеидеальной плазмы в настоящее время используется ряд динамических методик [8, 10, 15].

Ударное сжатие вещества в твердом или жидком исходном состоянии дает возможность получать за фронтом ударной волны состояние неидеальной вырожденной (статистика Ферми) и классической (статистика Больцмана) плазмы, сжатой до максимальных давлений примерно 4 Гбар и разогретых до температур порядка 10^7 К [10, 16], при которых плотность внутренней энергии плазмы сопоставима с ядерной плотностью энергии, а температуры близки к условиям, когда энергия и давление равновесного излучения начинают играть заметную роль в суммарной термодинамике и динамике таких высокоэнергетических состояний.

Для снижения эффектов необратимого нагрева целесообразно использовать сжатие вещества последовательностью падающих и отраженных ударных волн, когда сжатие становится близким к более «мягкому» изэнтропическому сжатию, позволяя получить значительно более высокие (в 10–50 раз) степени сжатия и более низкие (примерно в 10 раз) температуры по сравнению с однократным ударно-волновым сжатием. Многократное ударное сжатие было успешно применено для экспериментального изучения ионизации плазмы давлением [10, 17, 18] и диэлектризации вещества [10] при

мегабарных давлениях. Квазиadiaбатическое сжатие было также реализовано при взрывном высокосимметричном цилиндрическом сжатии водорода и инертных газов (рис. 6) [10, 18, 29, 30].

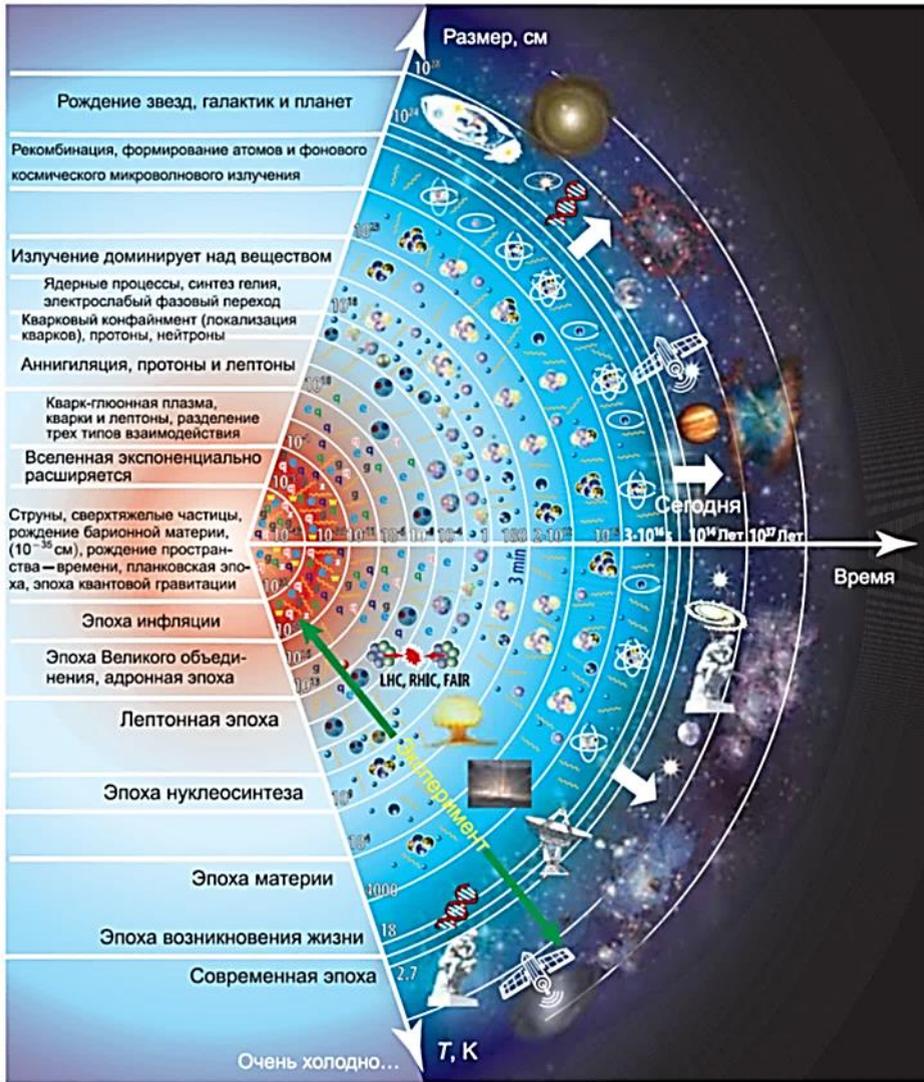


Рис. 2. Шкала времени после Большого взрыва

В работе [19] в дейтерии получены рекордные параметры плазмы. При начальном давлении газообразного дейтерия $p_0 = 267$ атм и температуре $T_0 = 10,5$ °C зарегистрирована плотность ударно-сжатой дейтериевой плазмы $\rho = (4,3 \pm 0,7)$ г/см³ при давлении $P = 1830$ ГПа. В этих условиях плазма

является сильнонеидеальной ($\Gamma \approx 4,5 \cdot 10^2$) с вырожденной ($n\lambda_e^3 \approx 2,8 \cdot 10^2$) электронной компонентой и числом электронов $n \approx 2,8 \cdot 10^{23} \text{ см}^{-3}$ (рис. 3).

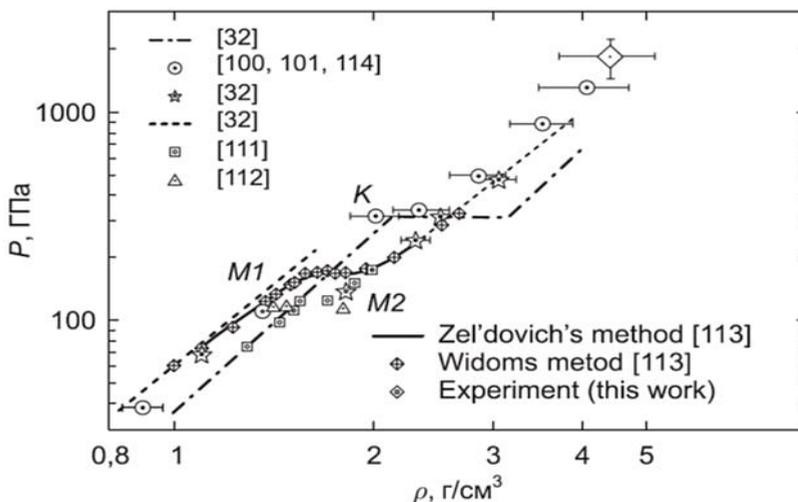


Рис. 3. Квазиизэнтропическое сжатие газообразного дейтерия в области давлений до 18 Мбар [19]. Ступенька в давлении привязана к плазменному фазовому переходу

На рис. 4 приведена схема эксперимента по измерению сжимаемости газов для моделирования экстремальных астрофизических явлений, проведенного в лабораторных условиях с использованием уникального рентгенографического комплекса ВНИИЭФ и экспериментальных устройств цилиндрической и сферической геометрии, трансформирующие ударно-волновое сжатие в квазиизэнтропическое.

Сжатие образующейся плазмы в таких устройствах осуществляется системой ударных волн, реверберирующих в ее объеме, и стальных оболочек, сходящихся к центру под действием продуктов взрыва мощного конденсированного взрывчатого вещества с массой до ≈ 85 кг ТНТ.

Этот процесс получил название квазиизэнтропического, т.к. после прохождения первой ударной волны дальнейшее сжатие плазмы происходит практически без ее существенного нагрева при более длительном удержании вещества в сжатом состоянии.

Целью проводимых экспериментов является регистрация траектории движения оболочек экспериментального устройства $R(t)$ и определение размера внутреннего каскада в момент «остановки», когда достигается максимальное сжатие исследуемого вещества.

Его плотность вычисляется из выражения:

$$\rho = \rho_0 \cdot (R_0/R_{\min})^n,$$

где ρ_0 – начальная плотность газа; R_0 и R_{\min} – внутренний радиус оболочки в исходном состоянии и в момент ее «остановки» соответственно; $n = 2$ или 3 для цилиндрической или сферической геометрии соответственно.

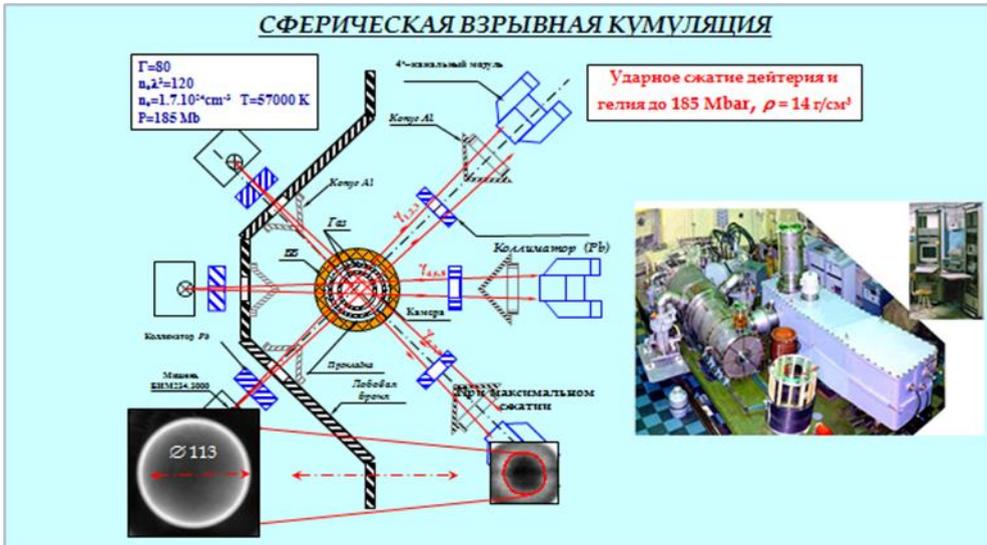


Рис. 4. Схема эксперимента ВНИИЭФ по измерению сжимаемости газов

Экспериментальное устройство сферической (или цилиндрической) геометрии с исследуемым газом размещалась перед бетонным сооружением, в котором смонтирован комплекс, разработанный под руководством члена-корреспондента РАН В.Д. Селемира, состоящий из трех безжелезных импульсных бетатронов БИМ234.3000 с граничной энергией электронов порядка 60 МэВ. Использование данных бетатронов позволяет просвечивать объекты с массовой толщиной $\sim 230 \text{ г/см}^2$, что эквивалентно толщине $\sim 200 \text{ мм}$ свинца.

Особенностью бетатронов ВНИИЭФ является их возможность работать в режиме последовательной генерации трех импульсов рентгеновского излучения с длительностью $\sim 150\text{--}180 \text{ нс}$. Это позволяет в эксперименте зарегистрировать одновременно до 9 фаз сжатия плазмы. В опытах используется оптико-электронная система детектирования, которая активируется синхронно с импульсами бетатрона. В качестве

преобразователей рентгеновского излучения в видимое в данной системе использованы монокристаллы йодистого натрия и силикат лютеция. Для устранения влияния рассеянного излучения на высокочувствительные детекторы размер поля регистрации в каждой из проекций ограничивается свинцовыми коллиматорами. Для защиты бетатронов и оптико-электронных регистраторов рентгеновского излучения применены алюминиевые конусы. На рисунке также показан внешний вид одного из бетатронов.

С использованием данной экспериментальной техники была исследована сжимаемость дейтерия, гелия и их смесей до плотности $\rho \approx 14 \text{ г/см}^3$ в области давлений до $P \approx 20000 \text{ ГПа}$ (200 Мбар). Эти величины в настоящее время являются рекордными в данной области исследований [20].

Использование экспериментальной техники мощных ударных волн для изучения экстремальных состояний вещества в настоящее время является основным источником информации о поведении сильносжатой сильнонеидеальной плазмы в области рекордно высоких температур и давлений мегабарного и гигабарного диапазонов. Будучи экзотическими для земных условий, эти ультраэкстремальные состояния вполне характерны для большинства астрофизических объектов, определяя строение, эволюцию и светимость звезд, планет Солнечной системы, а также более 100 открытых недавно экзопланет [10].

Кроме того, с плазмой ультрамегабарного диапазона связывают перспективные энергетические проекты по управляемому термоядерному синтезу с инерционным удержанием плазмы и реализацией высокотемпературных состояний в сжатом водороде. Эти обстоятельства являются постоянно действующим стимулирующим фактором по экспериментальному изучению свойств сильносжатой неидеальной плазмы водорода, дейтерия и инертных газов мощными ударными волнами, для возбуждения которых используются легкогазовые [17] и взрывные плоские, сферические и полусферические устройства, мощные лазеры и электродинамические ускорители [10, 18, 21].

4. Уникальное физическое явление – ядерный взрыв

Ядерный взрыв – это также и уникальное физическое явление, изучение которого представляет интерес не только для генерации и изучения экстремальных состояний вещества с помощью мощных ударных волн,

возбуждаемых ядерным взрывом, но и для ряда различных областей знаний.

Физики и в первую очередь разработчики ядерного оружия сразу же в полной мере оценили возможности ядерных взрывов как инструмента для генерации сверхмощных ударных и радиационных волн и изучения с их помощью ультраэкстремальных состояний вещества [10, 22–24].

Для получения необходимых сведений о физических свойствах и газодинамических особенностях поведения вещества в экстремальных условиях ядерного взрыва был развернут масштабный комплекс экспериментальных и теоретических работ, давших начало новой науке — физике высоких плотностей энергии [8, 16, 22, 23, 27] и динамической физике высоких давлений.

Создание ядерного оружия позволило экспериментаторам использовать невиданный по концентрации энергии источник для генерации мощных ударных волн в конденсированных средах. Поэтому, наряду с измерениями интегральных характеристик ядерного взрыва и его воздействия, уже в первых экспериментах стали изучаться физические свойства вещества при экстремальных давлениях и температурах. Физическая постановка и основные физические результаты таких экспериментов содержатся в обстоятельном обзоре [24] и представлены на (рис. 5) [10, 25, 26].

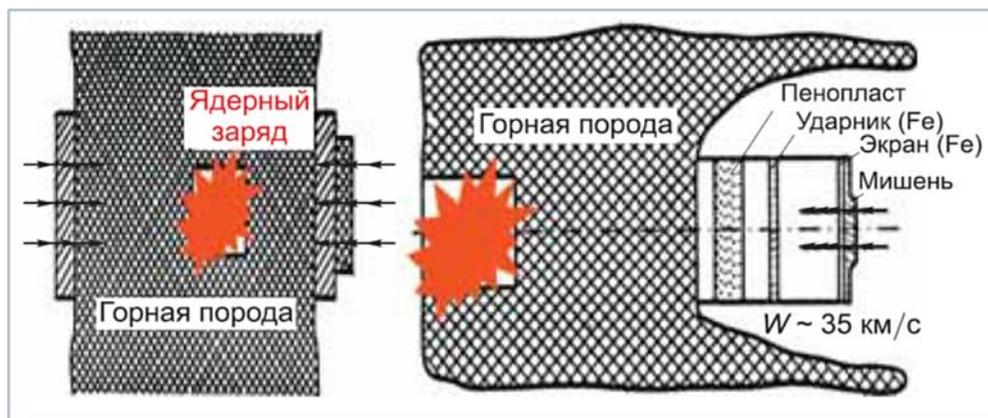


Рис. 5. Схема экспериментов по генерации мощных ударных волн в ближней зоне ядерного взрыва [10, 16, 24]

Мировой рекорд по давлению, при котором были измерены параметры уравнения состояния сильносжатой и многократно ионизированной плазмы, составляет $P \approx 4$ млрд атмосфер и получен в ближней зоне ядерного взрыва.

Совокупность экспериментальных данных по ударно-сжатой плазме алюминия приведена на (рис. 6), где наивысшие точки соответствуют рекордным в земных условиях параметрам [16, 24, 10].

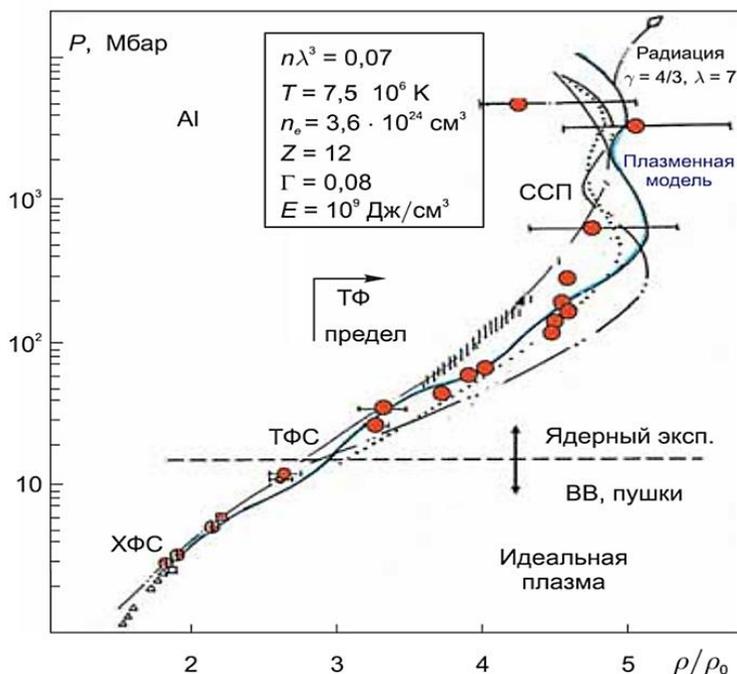


Рис. 6. Ударно-волновое сжатие алюминия до гигабарных давлений [10, 16, 24]

Плотность внутренней энергии такой плазмы составляет $E \approx 10^9$ Дж/см³, что близко к плотности энергии ядерной материи, а давление $P \approx 4$ Гбар близко к давлению во внутренних слоях Солнца. В этих условиях ($n_e \approx 4 \cdot 10^{24}$ см³, $T \approx 8 \cdot 10^6$ К) плазма невырождена, $n\lambda^3 \approx 0,07$, 12-кратно ионизирована, а параметр неидеальности невелик ($\Gamma \sim 0,1$), что является экспериментальной иллюстрацией тезиса об упрощении физических свойств плазмы в пределе ультравысоких плотностей энергии.

Исследованный диапазон параметров примыкает к области, где в термодинамике системы заметен вклад энергии и давления равновесного светового излучения:

$$E_R = 4\sigma T^4/c;$$

$$P_R = E_R/3 = 4/3 \sigma T^4/c.$$

Таким образом, реализуется режим динамики плазмы, близкий к радиационно-газодинамическому [4, 26].

Кроме возможности получения сверхвысоких плотностей энергии, эти опыты обладают и рядом других уникальных особенностей. Это широчайший диапазон изменения давления, одномерность и хорошая симметрия проведения измерений с использованием больших образцов, размеры которых на порядки превышают лабораторные.

В результате выполненных экспериментальных исследований был получен значительный объем бесценной информации в области ультравысоких давлений, к нижнему диапазону которого сейчас приближается техника мощных лазеров [10]. Рекордные в земных условиях плотности энергии плазмы получены именно в ближней зоне ядерного взрыва.

5. Мощные магнитные поля

Важнейшим направлением исследований в этой области физики является формирование сверхвысоких плотностей энергии электрического и магнитного полей. Российская наука со времен П.Л. Капицы занимала лидирующее положение в области генерации сильных магнитных полей. Сохранение магнитного потока в замкнутом проводнике при его симметричном сжатии взрывом позволило А.Д. Сахарову предложить метод магнитной кумуляции (МК) для реализации сверхсильных магнитных полей и разработать принцип действия первых взрывомагнитных генераторов.

В радиальном генераторе (генератор поля) исходный магнитный поток с индукцией B_0 радиально обжимается металлическим цилиндром, ускоряемым к центру детонацией конденсированного взрывчатого вещества. При условии сохранения магнитного потока

$$S = H_0 \pi R_0^2 = H \pi R^2$$

напряженность магнитного поля внутри цилиндра $H = H_0 (R_0/R)^2$ достигает многих мегагаусс [28].

Под руководством академика РАН А.И. Павловского были разработаны генераторы воспроизводимых сверхсильных магнитных полей десятимегагауссного диапазона, и рекорд магнитного поля доведен до 17 МГс [29]. Плотность энергии такого магнитного поля превосходит плотность энергии взрывчатых веществ.

С начала XXI столетия генератор воспроизводимых сверхсильных магнитных полей МК-1 использовался в серии международных экспериментов «Капица». Уникальная экспериментальная база Росатома в области

сверхсильных магнитных полей в качестве центра коллективного пользования предоставлялась для исследований электронной структуры различных материалов, включая органические металлы, гетероструктуры, магнитные материалы, определения характеристик фазовых переходов в физике твердого тела и критических магнитных полей в высокотемпературных сверхпроводниках [30].

Размещение во внутреннем объеме генератора МК-1 сверхсильных магнитных полей соосного полого цилиндра из проводящего материала позволяет преобразовать его в генератор для изоэнтропического сжатия веществ при давлении вплоть до 7 Мбар. В этом генераторе исследованы уравнения состояния при изоэнтропическом сжатии изотопов водорода, имеющие важное значение для определения характеристик планет-гигантов [31] и изоэнтропическому сжатию конструкционных материалов, имеющих прикладное значение.

Коллективом, под руководством члена-корреспондента РАН В.Д. Селемира, производятся работы по совершенствованию генераторов сверхсильных магнитных полей. В «матрешке» из вложенных друг в друга генераторов МК-1 реализованы предельные возможности использования энергии взрывчатых веществ и в макрообъемах ($\sim 3 \text{ см}^3$) получено максимальное на сегодняшний день магнитное поле – 28 МГс. Это наибольшее поле, которое удалось получить в макроскопических объемах на Земле (рис. 7).

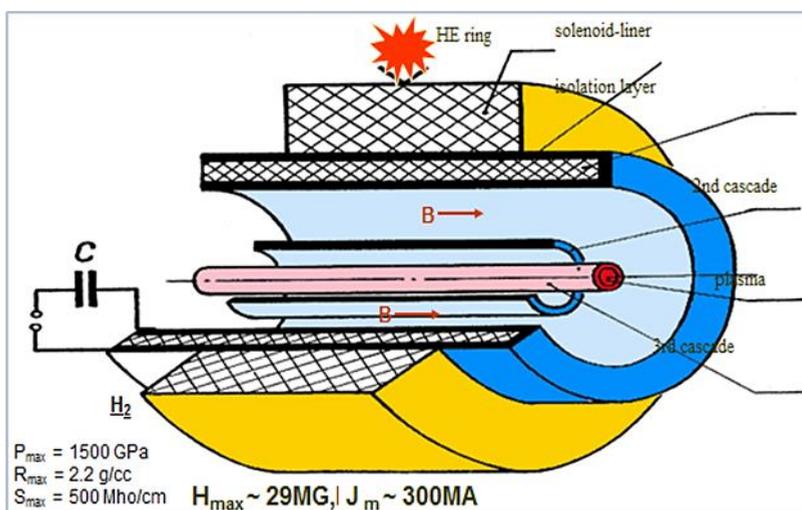


Рис. 7. Схема эксперимента по изоэнтропическому сжатию водорода сверхсильным магнитным полем [31]

Этим взрывным устройствам принадлежат сегодня также рекорды по величине импульсного электрического тока ~ 300 МА, что соответствует экстремально высокой электромагнитной энергии $H^2/8\pi \approx 3$ МДж/см³. Взрывомагнитные генераторы являются в настоящее время наиболее мощными энергетическими устройствами. Их мощность достигает 100 ГВт [31].

Продвижение в область сверхсильных магнитных полей стомегагауссного диапазона, при котором давление в макрообъемах порядка нескольких см³ достигает 400 млн атмосфер, потребует использования энергии атомного взрыва [32].

6. Устройства сильноточной импульсной энергетики

Использование устройств сильноточной (10^5 – 10^7 А) импульсной энергетики для получения плазмы высоких плотностей энергии осуществляется в различных экспериментальных постановках. Электрическая энергия может осуществлять прямой импульсный джоулев нагрев (электровзрыв) проводников либо магнитодинамическое сжатие и разогрев плазменных образований. Запасенная энергия может использоваться для получения интенсивных вспышек мягкого рентгеновского излучения (с радиационной температурой 200–300 эВ) с последующей генерацией этим излучением мощных ударных или радиационных тепловых волн либо для электродинамической генерации ударных волн, а также для электродинамического разгона металлических лайнеров.

Наибольшие параметры плазмы получены в настоящее время в мощных Z-пинчах тераваттного диапазона мощности, в которых электрическая энергия конденсаторов после соответствующих обострений осуществляет электродинамический разгон плазмы с последующей фокусировкой ее кинетической энергии на оси цилиндра [33, 34].

В этих экспериментах цилиндрическая плазменная оболочка (лайнер) создается электровзрывом сотен тонких (6–50 мкм) вольфрамовых проводников током 20 МА с фронтом нарастания порядка 100 нс. При схлопывании вокруг оси была получена вольфрамовая плазма с плотностью ионов порядка 10^{20} см⁻³ и степенью ионизации более 50.

В экспериментах на установке АНГАРА [34–36] (рис. 8) импульсный ток ~ 4 МА разгонял плазменный ксеноновый лайнер до скорости ~ 500 км/с.

Высокосимметричный удар этого лайнера о поверхность цилиндрической сильнопористой мишени возбуждал в ней тепловую радиационную волну, излучающую мягкое рентгеновское излучение с температурой порядка 100 эВ. Это интенсивное рентгеновское излучение из цилиндрической полости использовалось для высокосимметричной генерации плоских ударных волн с амплитудой давления ~ 5 Мбар, для возбуждения тепловых радиационных волн со скоростью распространения ~ 100 км/с, а также для разгона металлических ударников до 10–12 км/с.

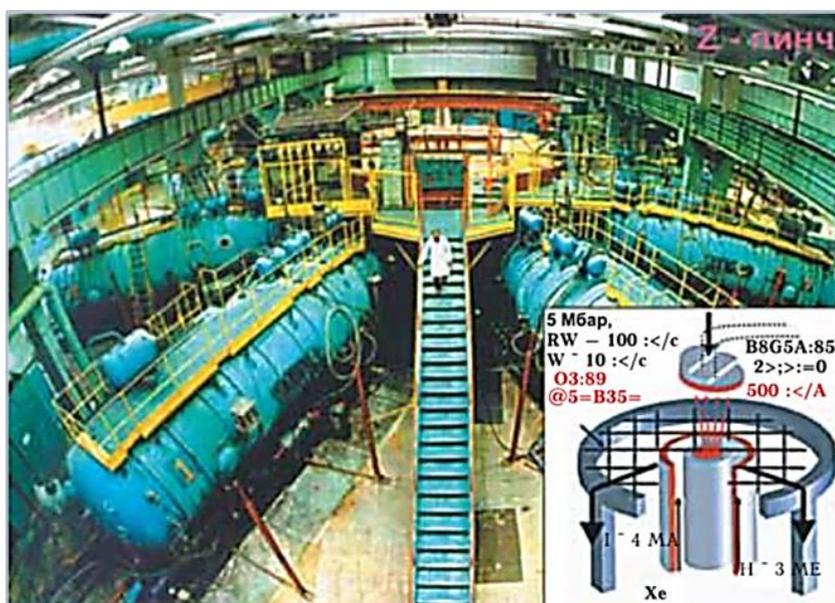


Рис. 8. Импульсный генератор АНГАРА-5, ТРИНИТИ [35]

7. Генерация макроскопических объемов горячей плазмы

Важной положительной особенностью ускоренных пучков заряженных частиц является объемный характер их энерговыделения [37]. Этим они отличаются от лазерного излучения, где основное энерговыделение излучения с частотой $\omega_{\text{л}}$ происходит в узкой критической зоне [38–40]

$$\omega_{\text{л}} \sim \omega_{\text{р}} \sim 4\pi e^2 n_e / m_e,$$

а затем передается вглубь мишени электронной теплопроводностью.

В результате торможения заряженных частиц возникает слой изохорически разогретой плазмы, последующее расширение которого генерирует ударную волну вглубь мишени или цилиндрическую ударную

волну, расходящуюся от оси пучка. В современных исследованиях в области физики высоких плотностей энергии используются обе эти методики – изохорический нагрев и сжатие ударными волнами, генерируемыми корпускулярными пучками.

Ускорители релятивистских тяжелых ионов, созданные для экспериментов по физике высоких энергий, оказались перспективными устройствами не только для управляемого термоядерного синтеза с инерционным удержанием, но и для опытов по сжатию и разогреву плотной плазмы [37, 41].

Пучки тяжелых ионов, с кинетической энергией 3–300 МэВ на нуклон, применялись в экспериментах по нагреву конденсированных и пористых мишеней, по измерению тормозной способности ионов в плазме, а также по взаимодействию заряженных пучков с ударно-сжатой плазмой, получаемой с помощью взрывных генераторов и мини-взрывных ударных труб [1, 33, 36–38].

Особый интерес представляет использование тяжелоионного ускорителя GSI в комбинации с мощной петаваттной лазерной системой PHELIX (рис. 9), что качественно расширяет экспериментальные возможности такого устройства. Возможности и перспективы применения ускорительных комплексов GSI в г. Дармштадт (ФРГ) представлены на рис. 10.

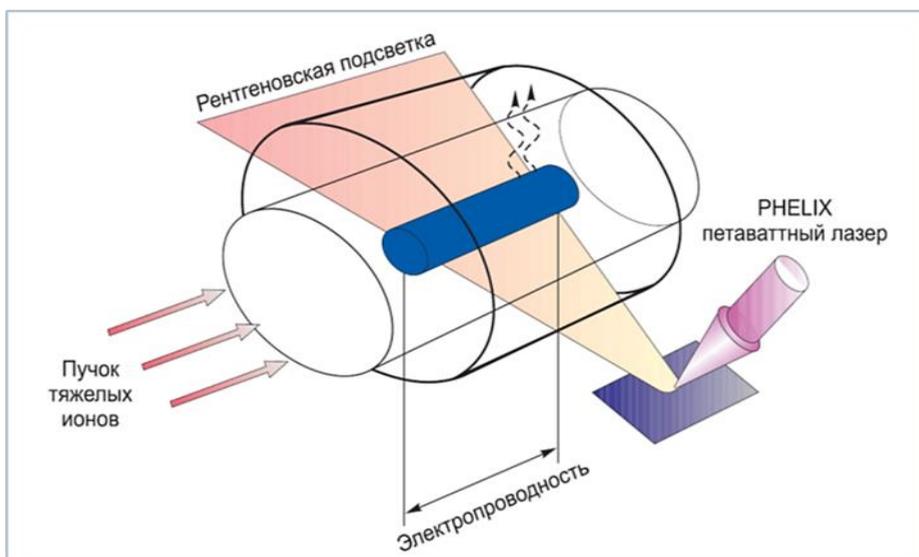


Рис. 9. Схема эксперимента NINEX проекта FAIR с использованием релятивистского пучка тяжелых ионов и петаваттного лазера [37, 42]

Анализ рис. 10 показывает, что интенсивные релятивистские пучки тяжелых ионов имеют перспективу для генерации плазмы высокой плотности энергии, а также для импульсного термоядерного синтеза [37, 42].

Таким образом, ускорители релятивистских заряженных частиц, созданные для проведения исследований по физике высоких энергий и по ядерной физике, сейчас с успехом применяются и для работ по фундаментальной физике плазмы высоких плотностей энергии.

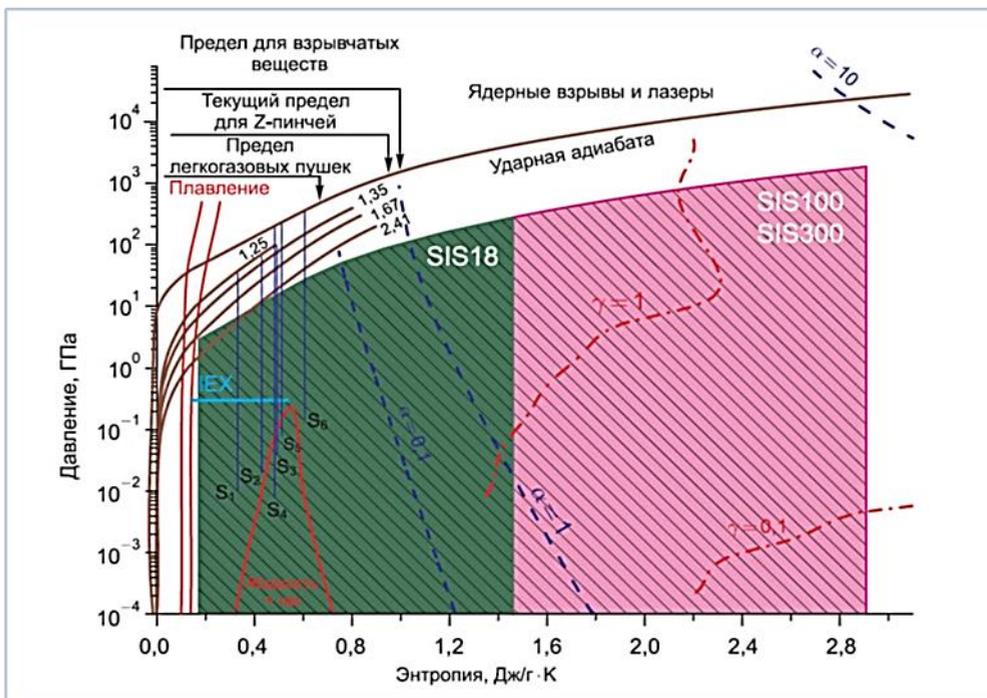


Рис. 10. Возможности ускорителей тяжелых ионов для генерации высоких плотностей энергии в свинце

Заключение

Ударно-волновая техника эксперимента играет сегодня ведущую роль в физике высоких плотностей энергии, позволяя получать максимальные давления мегабарного и гигабарного диапазонов для многих химических элементов и соединений. Достигнутый в настоящее время диапазон максимальных динамических давлений на шесть порядков превосходит давления при ударе пули, на три порядка – давление в центре Земли и оказывается близким [10] к давлению в центральных слоях Солнца и мишенях инерционного термоядерного синтеза.

Такие экзотические состояния вещества возникали при рождении нашей Вселенной спустя несколько секунд после Большого взрыва [9, 10]. В определенном смысле можно считать, что, последовательно увеличивая давление и температуру в динамических экспериментах, мы как бы двигаемся вспять по оси времени, приближаясь к моменту рождения Вселенной – Большому взрыву (см. рис. 2).

Изучение эволюции ранней Вселенной дает уникальную возможность исследовать высокоэнергетические явления, которые невозможно воссоздать в лаборатории.

По современным представлениям [43], эволюция Вселенной во времени проходила крайне неравномерно – сравнительно медленная сейчас, она была поразительно быстрой на ранних стадиях, так что серьезные качественные изменения состояния Вселенной происходили за доли секунды.

Наблюдаемая в настоящее время Вселенная возникла около 13,7–14 млрд лет назад из некоторого начального сингулярного состояния с бесконечно большими температурой и плотностью и с тех пор непрерывно расширяется до современных размеров порядка 10^{28} см, охлаждаясь до средних температур порядка 2,7 К. Согласно теории Большого взрыва, дальнейшая эволюция зависит от нынешней скорости расширения Вселенной и средней плотности вещества в современной Вселенной.

Наука о строении вещества при высоких плотностях энергии и космофизика тесно связаны и взаимно переплетены. И хотя предельные давления лабораторной плазмы пока отличаются от максимальных астрофизических значений на 20–30 порядков, этот разрыв стремительно сокращается, а физические процессы в лаборатории и космосе часто демонстрируют поразительное разнообразие и вместе с тем глубокие аналогии, свидетельствуя, как минимум, о единстве физических принципов поведения вещества в широчайшем диапазоне плотностей (примерно 42 порядка) и температур (до 10^{13} К).

Физика высокой плотности энергии и экстремальных состояний вещества динамично развивается благодаря активному сотрудничеству ученых РАН и Госкорпорации «Росатом» на протяжении 75 лет и будет активно развиваться в будущем.

Литература

1. Зельдович Я.Б., Харитон Ю.Б. ЖЭТФ, 1940, т.10, 477.
2. Атомный проект СССР. Документы и материалы. Т.1. 1938–1945 / под редакцией Л.Д. Рябева. – М.: Физматлит, 1998.
3. Фортов В.Е. Мощные ударные волны и экстремальные состояния вещества // УФН, 2007. Т.177, №4, 347.
4. Сахаров А.Д. Научные труды ОТФ ФИАН. – М.: Центрком, 1960.
5. Атомный проект СССР. Документы и материалы. Т.2. Атомный Проект 1945–1954 / под редакцией Л.Д. Рябева. – М.: Физматлит, 1999.
6. Гончаров Г.А., Рябев Л.Д. О создании первой отечественной атомной бомбы // УФН, 2001. Т.171, №1, 79-104.
7. Андрушин И.А., Ильяев Р.И., Чернышов А.К. Решающий шаг к миру. Водородная бомба с атомным обжатием РДС-37. – Саров: РФЯЦ ВНИИЭФ, 2010.
8. Фортов В.Е., Храпак А.Г., Якубов И.Т. Физика неидеальной плазмы. – М.: Физматлит, 2004.
9. Гинзбург В.Л. О физике и астрофизике. – М.: Бюро Квантум, 1995.
10. Фортов В.Е. Физика высоких плотностей энергии. – М.: Физматлит, 2013.
11. Анисимов С.И., Прохоров А.М., Фортов В. Е. Применение мощных лазеров для исследования вещества при сверхвысоких давлениях // УФН, 1984. Т. 142, № 3, 395.
12. Киржниц Д. А. Экстремальные состояния вещества (сверхвысокие давления и температуры) // УФН, 1971. Т. 104, №7. С. 489.
13. Энциклопедия низкотемпературной плазмы / Под ред. В.Е. Фортова. – М.: Наука, 2000.
14. Зельдович Я. Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. – М.: Наука, 1966.
15. Альтшулер Л. В., Трунин Р.Ф., Урлин В.Д. и др. Развитие в России динамических методов исследований высоких давлений // УФН, 1999. Т. 169, №3. С. 323.
16. Аврорин Е.Н., Симоненко В.А., Шибаршов Л.И. Физические исследования при ядерных взрывах // УФН, 2006. Т. 176, №4. С. 449.
17. Nellis W. J. Dynamic Compression of Materials: Metallization of Fluid Hydrogen at High Pressures // Rep. Prog. Phys. 2006. V. 69, №5. P. 1479–1580.
18. Фортов В.Е., Терновой В.Я., Жерноклетов М.В. и др. Ионизация давлением неидеальной плазмы в мегабарном диапазоне динамических давлений // ЖЭТФ, 2003. Т. 124, №2. С. 288.
19. Мочалов М.А., Ильяев Р.И., Фортов В.Е. и др. Измерение сжимаемости дейтериевой плазмы при давлении 1800 ГПа // Письма ЖЭТФ, 2010. Т. 92, №5. С. 336–340.

20. Илькаев Р.И., Мочалов М.А. и др. ЖЭТФ, 146, 169-185 (2014).
21. Трунин Р.Ф., Урлин В.Д., Медведев А.Б. Динамическое сжатие изотопов водорода при мегабарных давлениях // УФН, 2010. Т. 180, №6. С. 605–622.
22. Альтшулер Л.В. Успехи физики высоких давлений // УФН, 1970. Т. 100, №4. С. 721–723.
23. Трунин Р.Ф. Ударная сжимаемость конденсированных веществ в мощных ударных волнах подземных ядерных взрывов // УФН, 1994. Т. 164, №11. С. 1215–1237.
24. Жерноклетов М.В., Зубарев В.Н., Трунин Р.Ф., Фортов В.Е. Экспериментальные данные по ударной сжимаемости и адиабатическому расширению конденсированных веществ при высоких плотностях энергии. – Черногловка: ИХФ РАН, 1996.
25. Аврорин Е.Н., Водолага Б.К., Симоненко В.А., Фортов В.Е. Мощные ударные волны и экстремальные состояния вещества // УФН, 1993. Т. 163, №5. С. 1–34.
26. Аврорин Е.Н. и др. Экспериментальное изучение оболочечных эффектов на ударных адиабатах конденсированных веществ. ЖЭТФ, 1987. Т. 93. №2. С. 613–626.
27. Илькаев Р.И. О фундаментальных физических исследованиях во Всероссийском научно-исследовательском институте экспериментальной физики // УФН, 2011. Т. 181, №4. С. 405–410.
28. Взрывные генераторы мощных импульсов электрического тока / Под ред. В.Е. Фортова. – М.: Наука, 2002.
29. Павловский А.И., Быков А.И., Колокольчиков Н.П. и др. Генерация воспроизводимых импульсных магнитных полей до 20 МГц // ДАН, 1994. 34.3. С. 300–303.
30. V.D. Selemir, O.M. Tatsenko, V.V. Platotnov Investigations in solid state physics in ultra-high magnetic fields – experimental Results of Kapitsa series. In proceedings of the Tenth International Conference in Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics, Berlin, 2004 edited by V.von Ortenberg.
31. G.V. Boriskov, A.I. Bykov, N.I. Egorov et al Y. Phys: Conf. Ser. 121 072 001 (2008).
32. Таценко О.М., Селемир В.Д., Моисеенко А.К. и др. Оптические устройства измерений в физике высоких плотностей энергии. Под ред. В.Д. Селемира, О.М. Таценко, Ю.Б. Кудасова, Саров 2020.
33. Jones B., Ampleford D.J., Vesey R.A. et al. Planar wire-array Z-pinch implosion dynamics and X-ray scaling at multiple-MA drive currents for a compact multisource hohlraum configuration // Phys. Rev. Lett. 2010. V. 104. P. 125001.
34. Гасилов В.А., Захаров С.В., Смирнов В.П. О генерации мощных потоков излучения и получении мегабарных давлений в лайнерных системах // Письма ЖЭТФ, 1991. Т. 53, №2. С. 83.
35. Грабовский Е.В., Воробьев О.Ю., Дябилин К.С. и др. Генерация мощных ударных волн мягким рентгеновским излучением плазмы Z-пинча // Письма ЖЭТФ, 1994. Т. 60, №1. С. 3.

36. Смирнов В.П., Черковец В.Е. и др. Физика плазмы. 2020. 46. С. 879.
37. Фортов В.Е., Хоффманн Д., Шарков Б.Ю. Интенсивные ионные пучки для генерации экстремальных состояний вещества // УФН, 2008. Т. 178, №2, С. 113.
38. Анисимов С.И., Прохоров А.М., Фортов В.Е. Применение мощных лазеров для исследования вещества при сверхвысоких давлениях // УФН, 1984. Т. 142, №3. С. 395.
39. Atzeni S., Meyer-ter-Vehen J. The Physics of Inertial Fusion. – Oxford: Clarendon Press, 2004.
40. Lindle J. Inertial Confinement Fusion. – N.Y.: Springer, 1998.
41. Ядерный синтез с инерционным удержанием / Под ред. Б.Ю. Шаркова. – М.: Физматлит, 2005.
42. Tahir N.A., Deutsch C., Fortov V. E. et al. Studies of strongly coupled plasmas using intense heavy ion beams at the future FAIR facility: the HEDGeHOV collaboration // Contrib. Plasma Phys. 2005. V. 45, №3 – 4. P. 229–235.
43. Хокинг С. Краткая история времени. От Большого взрыва до черных дыр. – СПб.: Амфора, 2007.

С.Г. Гаранин¹, С.В. Гарнов², А.М. Сергеев³, Е.А. Хазанов⁴

МОЩНЫЕ ЛАЗЕРЫ ДЛЯ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ПЛОТНОСТЕЙ ЭНЕРГИИ

Рассмотрены основные результаты исследований по лазерной физике и физике высоких плотностей энергии, проведенных учеными академических институтов и предприятий атомной отрасли. Представлены проекты создания перспективной экспериментальной лазерной базы и сформулированы основные направления исследовательских работ.

Введение

Лазер является уникальным устройством, энергию излучения которого можно сконцентрировать в малом объеме. В результате появляется возможность проведения исследований в области физики высоких плотностей энергии. За более чем 60 лет после изобретения лазера [1] проведен широкий круг исследований по взаимодействию лазерного излучения с веществом, исследованы свойства высокотемпературной плотной плазмы, обоснованы подходы к применению лазера для зажигания в лабораторных условиях термоядерного горючего и решения на этой основе проблемы управляемого термоядерного синтеза, сформированы подходы к проведению перспективных экспериментов в области поведения веществ в экстремальных состояниях, лабораторной астрофизики, физики вакуума, создания компактных ускорителей и многих других.

Для решения этих задач физики-лазерщики на разных этапах развития технологий создали мощные источники, обеспечивающие генерацию излучения в диапазоне от рентгеновской до дальней инфракрасной области спектра. При этом генерация получена с активными средами, находящимися во всех агрегатных состояниях. Для накачки использованы различные источники энергии от диодной до взрывной. Разработаны способы получения

¹ Генеральный конструктор по лазерным системам – заместитель директора РФЯЦ-ВНИИЭФ по лазерно-физическому направлению, директор Института лазерно-физических исследований, академик РАН.

² Директор ФИЦ ИОФ им. А.М. Прохорова РАН, член-корреспондент РАН.

³ Президент РАН, главный научный сотрудник ФИЦ ИПФ РАН, академик РАН.

⁴ Заместитель директора по научной работе, руководитель отделения ИПФ РАН, академик РАН.

лазерного излучения произвольной временной формы от импульсного фемтосекундной длительности до непрерывной генерации.

Существенный вклад в развитие как собственно физики лазеров, так и в проведение с их помощью исследований физики высоких плотностей энергии внесли ученые академических институтов и предприятий атомной отрасли нашей страны. При этом значительная часть уникальных результатов получена в результате совместных экспериментальных и расчетных исследований.

В 1965 году по инициативе академиков Ю.Б. Харитона и Н.Г. Басова во ВНИИЭФ начались экспериментальные работы по созданию лазеров с максимально достижимой энергией на базе взрывных фотодиссоционных йодных лазеров (ВФДЛ), в которых для создания инверсии используется излучение фронта ударной волны, генерируемой в инертном газе взрывом взрывчатого вещества (ВВ). Эти работы выполнялись под руководством члена-корреспондента С.Б. Кормера большим коллективом исследователей.

На этом принципе в 1970 г. во ВНИИЭФ, в кооперации с ФИАН и ГОИ, был создан лазер мегаджоульного уровня энергии [2]. Параметры излучения этого лазера оставались рекордными вплоть до запуска в 2009 году в США установки NIF (National Ignition Facility) с энергией импульса 1,8 МДж [3]. Дальнейшее развитие исследований по оптимизации лазерной среды и применению устройства обращения волнового фронта для компенсации оптических неоднородностей позволила получить на ВФДЛ практически дифракционную расходимость излучения и создать лазеры с рекордной силой излучения 10^{14} Дж/ср (10^{19} Вт/ср) [4].

В начале 70-х годов прошлого века в СССР активно начали развиваться исследования в области создания мощных химических фтор-водородных лазеров под руководством академиков Н.Г. Басова и Ю.Б. Харитона, членов-корреспондентов В.Л. Тальрозе, С.Б. Кормера. Результатом этих работ было получение рекордного значения удельной энергии излучения, приходящегося на единицу объема активной среды: 240 Дж/л [5], а также создание во ВНИИЭФ совместно с РНЦ «Прикладная химия» самого мощного в мире химического лазера с энергией в импульсе 40 кДж [6].

Важным этапом совместных работ РАН и ГК «Росатом» являлись исследования по физике мощных химических кислородно-йодных лазеров (КИЛ), которые стартовали во ВНИИЭФ в 1981 году по инициативе члена-корреспондента С.Б. Кормера. Результатом этих исследований стало создание

во ВНИИЭФ совместно с Самарским филиалом ФИАН стенда непрерывного КИЛ мультикиловаттного уровня мощности с рекордным уровнем химической эффективности 34% [7].

Ключевым направлением физики высоких плотностей энергии являются исследования в интересах управляемого термоядерного синтеза, в рамках которых проводились и проводятся широкомасштабные экспериментальные и расчетные исследования физики лазерно-плазменного взаимодействия и поведения вещества в экстремальных состояниях. Специалисты РАН и ГК «Росатом» вносят существенный вклад в проведение этих работ. Более подробно основные результаты этих исследований будут рассмотрены ниже.

Отметим, что для дальнейшего развития этих исследований в России предусмотрена реализация 4-х крупных проектов (рис. 1) по созданию:

- в РФЯЦ-ВНИИЭФ мощной лазерной установки с мегаджоульным уровнем энергии для осуществления зажигания термоядерного горючего в лабораторных условиях;

- в ИПФ РАН лазерного комплекса XCEL экзаваттного уровня мощности с фемтосекундной длительностью лазерного импульса для исследования физики поведения вещества при сверхвысоких давлениях и сверхсильных магнитных полях, физики вакуума и создания компактных ускорителей заряженных частиц;

- в ТРИНИТИ лазерной системы «Частота» с частотой следования 10 Гц наносекундных лазерных импульсов энергией порядка 1 кДж для отработки технологии создания драйвера лазерной термоядерной электростанции;

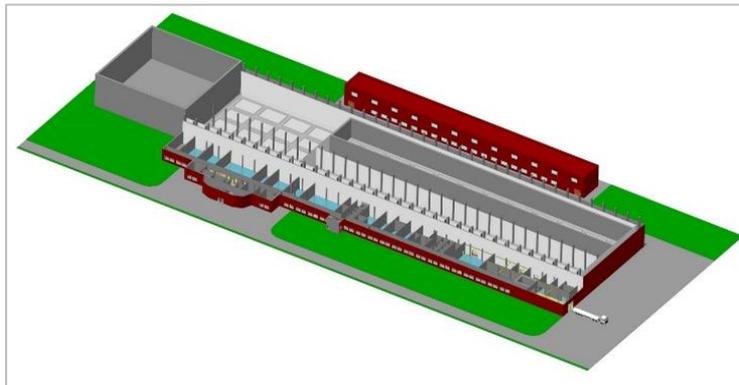
- в НИЯУ МИФИ установки «Эльф» для исследований по физике высоких плотностей энергии и подготовки кадров в области лазерной физики и лазерного термоядерного синтеза.

Исследования физики термоядерной плазмы

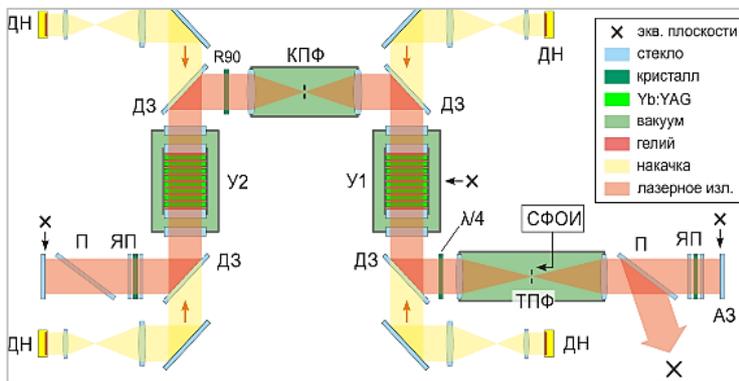
В земных условиях эффективное горение термоядерного горючего было впервые продемонстрировано в начале 50-х годов прошлого века при успешном испытании термоядерного оружия. Практически в это же время (1950 г.) А.Д. Сахаров и И.Е. Тамм выдвинули идею удержания и термоизоляции плазмы с помощью магнитного поля, после чего стали интенсивно развиваться исследования по получению управляемого термоядерного синтеза на основе схем с магнитным удержанием плазмы.



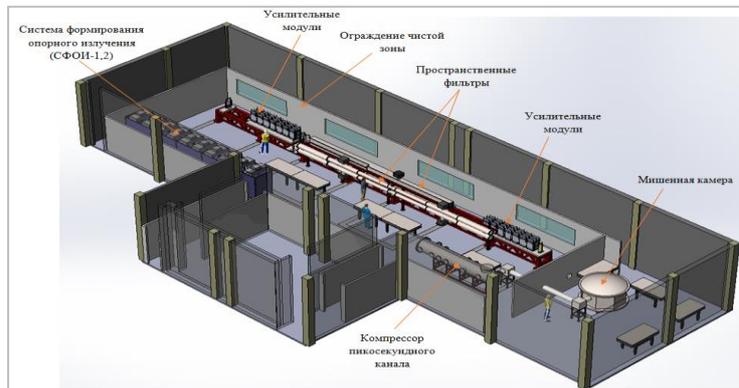
а)



б)



в)



г)

Рис.1. Проекты создаваемых в России перспективных лазерных систем: установка с мегаджоульным уровнем энергии (а), экзаваттный комплекс XCEL (б), принципиальная схема канала частотного лазера (в), установка «Эльф» (г)

Создание лазера в начале 60-х годов инициировало предложение по его использованию для зажигания термоядерного горючего в лабораторных условиях. В СССР практически одновременно независимо были сформулированы предложения в ФИАНе и во ВНИИЭФ. По воспоминаниям коллег [8], академик А.Д. Сахаров предложил на семинаре во ВНИИЭФ эллиптическую схему лазерного облучения маленькой оболочки, содержащей термоядерное топливо. Данное предложение не было опубликовано. Первой опубликованной работой по использованию лазера для нагрева термоядерной смеси явилась работа академиков Н.Г. Басова и О.Н. Крохина [9]. Несколько позже была опубликована работа американских коллег [10].

Эти предложения дали старт созданию в нашей стране и за рубежом семейства лазерных установок по исследованиям физики термоядерной плазмы и возможности зажигания термоядерного горючего с помощью лазера.

Основными установками, на которых проводились исследования в нашей стране, являлись: «Дельфин» [11], «Кальмар» [12] (обе ФИАН), «УМИ-35» [13] (ИОФАН), «Искра-4» [14] (ВНИИЭФ), «Прогресс» [15] (ГОИ), «Сокол» [16] (ВНИИТФ), «Искра-5» [17] (ВНИИЭФ). Этими работами руководили выдающие советские ученые Н.Г. Басов, Ю.Б. Харитон, С.Б. Кормер, О.Н. Крохин, Г.А. Кириллов, А.А. Мак.

К концу 90-х годов XX века ведущими мировыми лабораториями были получены принципиальные результаты, демонстрирующие возможность достижения отдельных параметров, необходимых для зажигания лазерной микромишени:

получено $\geq 10^{14}$ DT-нейтронов за импульс [18];

осуществлено, близкое к сферически симметричному, объемное сжатие DT-газа в 10^3 – 10^4 раз [19–21];

при объемных сжатиях $\leq 10^3$ реализован нагрев DT-плазмы до температур 5–7 кэВ [18–21].

Также были выполнены расчетные и экспериментальные исследования по обоснованию облика самого лазера-драйвера.

Одним из основных вопросов использования лазеров для сжатия лазерных мишеней является вопрос об эффективности поглощения лазерного излучения. При высоких интенсивностях ($I \geq 10^{14}$ – 10^{15} Вт/см²), необходимых для получения требуемого давления, разгоняющего сферическую оболочку, взаимодействие лазерного излучения с плазмой носит нелинейный характер.

Возрастает роль плазменных неустойчивостей, приводящих, с одной стороны, к снижению энерговыклада лазерной энергии в мишень, а с другой, к генерации быстрых заряженных частиц, которые, имея большой пробег, прогревают ДТ-плазму и снижают эффективность сжатия.

Исследование этих явлений осуществлялось на многих установках в нашей стране и за рубежом, на основании которых были созданы физические модели, хорошо описывающие совокупность экспериментальных данных. Данные модели опираются на теоретические исследования этих процессов специалистами академических институтов (и в первую очередь ФИАН [22]).

На установке «Искра-4» при облучении сферических микромишеней экспериментально исследованы коэффициент поглощения и доля энергии, переданная быстрым ионам, от интенсивного лазерного излучения на поверхности мишени. Полученные данные подтвердили, что при $I\lambda^2 \approx (5 \times 10^{14} - 5 \times 10^{15}) \text{ Вт/см}^2 \text{ мкм}^2$ наблюдается снижение коэффициента поглощения лазерного излучения мишенью и до 40% энергии передаётся быстрым ионам.

Еще одной важной задачей при решении проблемы ЛТС является обеспечение режима высокооднородного сферически симметричного обжатия лазерной мишени. Эксперименты по исследованию влияния асимметрии на динамику сжатия были выполнены во ВНИИЭФ на установке «Искра-5», которая была запущена в 1989 году. Это 12-канальная установка мощностью 120 ТВт на базе фотодиссоционного йодного лазера, уступавшая на момент создания по мощности только установке Nova (США) [23].

На первом этапе были проведены экспериментальные и расчётные исследования конструкции бокса-конвертера излучения, обеспечивающего наибольшую однородность облучения центральной капсулы [24]. Использовались мишени непрямого облучения, состоящие из медного бокса диаметром от 2 до 4 мм, в центре которого помещалась стеклянная капсула диаметром от 270 до 900 мкм.

Показано, что при отношении радиусов бокса и капсулы в диапазоне 5–10 достигалась неоднородность рентгеновского потока на поверхности капсулы < 3%. При этом эффективная температура рентгеновского излучения (РИ) в боксе составляла до 170 эВ, а нейтронный выход из мишеней в DD-нейтронах – до 10^{10} за импульс, не обнаруживая существенных отклонений от одномерного поведения вплоть до объёмных сжатий $\sim 2 \cdot 10^3$ [25]. При больших

степенях сжатия снижение нейтронного выхода по отношению к сферически-симметричному случаю было объяснено влиянием турбулентного перемешивания.

Были проведены исследования влияния крупномасштабной асимметрии на сжатие и генерацию нейтронного выхода [26], которые показали хорошее соответствие экспериментальных результатов с двумерными газодинамическими расчетами по комплексу МИМОЗА-НД [27].

Таким образом, проведенный комплекс экспериментальных и расчётных работ к началу XXI века позволил уточнить формулировки требований к облику установки для реализации зажигания термоядерного топлива [3, 28, 29]. Одновременно была продемонстрирована готовность всех необходимых технологий для осуществления данных проектов. На повестке стояла задача создания многоканальных (до ~ 200 каналов) лазерных систем на неодимовом фосфатном стекле с энергией в несколько мегаджоулей, преобразованием излучения во вторую или третью гармонику, профилированной формой импульса и неоднородностью облучения ДТ-мишени менее 1–2%.

В России для отработки основных технических решений проекта такой установки в 2001 г. была введена в эксплуатацию четырехканальная установка на неодимовом стекле «Луч» (рис. 2) [30], на которой в уменьшенной световой апертуре пучка (18,5×18,5 см) была получена энергия 3,3 кДж с канала, управляемая временная форма лазерного импульса и обеспечена повторяемость энергетических и временных параметров излучения на выходе усилительного канала на уровне менее 5%. При этом пространственная неоднородность пучка по интенсивности составила < 20% при расходимости излучения ~ $4,5 \cdot 10^{-5}$ радиан при числе Штреля ~ 0,4.

Для достижения высокой однородности излучения были разработаны и введены в строй стационарные устройства гомогенизации пучка (фазовые пластины и линзовые растры). На мишенях обеспечена неоднородность огибающей распределения интенсивности пучка менее 5%. Для устранения ВЧ-пространственной модуляции в пятне фокусировки применен задающий генератор с шириной спектра излучения ~ 1 ТГц и оптоволоконным сглаживанием, обеспечивший уменьшение СКО распределения интенсивности до 1–2% с учетом пространственных масштабов < 30 мкм.

Другим направлением исследований, проводимых на установке, являлись

работы по развитию комплексов диагностики параметров лазерного, рентгеновского и корпускулярных излучений. Общая стратегия проведения работ сводилась к развитию методов регистрации быстропротекающих процессов, в том числе и в сложной помеховой обстановке.



Рис. 2. Установка «Луч»

И, наконец, третьей, но не менее важной, целью работ на установке «Луч» являлись исследования по моделированию физических явлений в высокотемпературной плотной лазерной плазме и экспериментальная отработка перспективных конструкций мишеней. На установке осуществлен ряд программ по облучению мишеней в интересах:

- исследования экстремальных состояний вещества;
- тестирования программ радиационной газовой динамики;
- пополнения баз данных в части уравнения состояния материалов;
- исследования явлений откола и физики прочности, в том числе с точки зрения предотвращения астероидной опасности.

Одним из основных направлений работ на установке стало исследование сжимаемости материалов (на настоящий момент на установке по этому направлению проводится более 100 экспериментов в год). Исследуются ударная и безударная сжимаемость и разгрузка широкого спектра материалов (конденсированные, пористые, оптически прозрачные) [31]. Разработаны

новые мишенные конструкции, которые позволяют продвинуть исследования в мультимегабарный (до 100 Мбар) диапазон давлений. Для проведения работ используются материалы, полученные средствами магнетронного напыления и из механически изготовленных фольг (без нарушения внутренней структуры).

В экспериментах 2020 года показан существенный потенциал применения малоплотных пен для повышения давления за фронтом ударной волны. При умеренной интенсивности излучения $I \leq 1,5 \cdot 10^{13}$ Вт/см² получены скорости УВ в Al более 40 км/с. На рис.3 иллюстрируется постановка и некоторые результаты экспериментов по гидродинамическому увеличению давления в мишенной конструкции на основе малоплотного аблятора

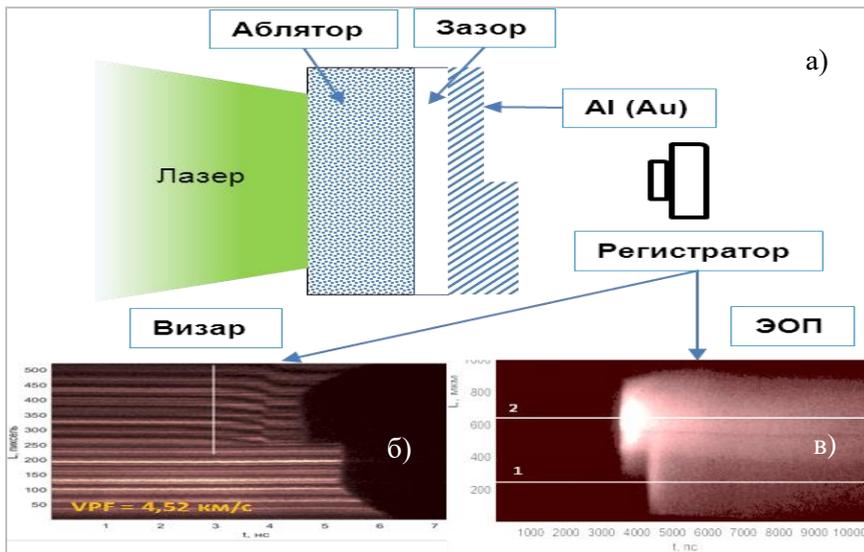


Рис. 3. Постановка экспериментов по гидродинамическому увеличению давления в мишенной конструкции на основе малоплотного аблятора (а), результаты диагностики предварительного разогрева конструкции и регистрируемой скорости УВ (б), времени выхода и светимости материалов мишени (в)

В последние годы проведен представительный цикл работ по моделированию процессов взрывного разрушения крупных космических объектов (астероидов) на основе принципа подобия [32]. Предложен вариант воспроизведения разрушительного воздействия ядерного взрыва с помощью фокусировки мощного импульсного лазерного излучения на мини-макету, имитирующие реальные небесные тела.

Проведены детальные расчёты, учитывающие широкий спектр процессов, с целью определения удельных энергий воздействий в том и другом случаях. При варьировании энергий воздействия (порядка нескольких мегатонн для ядерного взрыва и нескольких сотен джоулей для лазерного импульса) удалось достигнуть одинаковых по амплитуде и подобных по времени профилей давления в ударно-волновой фазе разрушения астероида и его макета. При разнице в 12–14 порядков по объёму и массе поправочный коэффициент в критерии энергетического подобия составил $k=1/2$ (удельная энергия ядерного взрыва в два раза меньше, чем при применении лазера) (см. рис. 4).

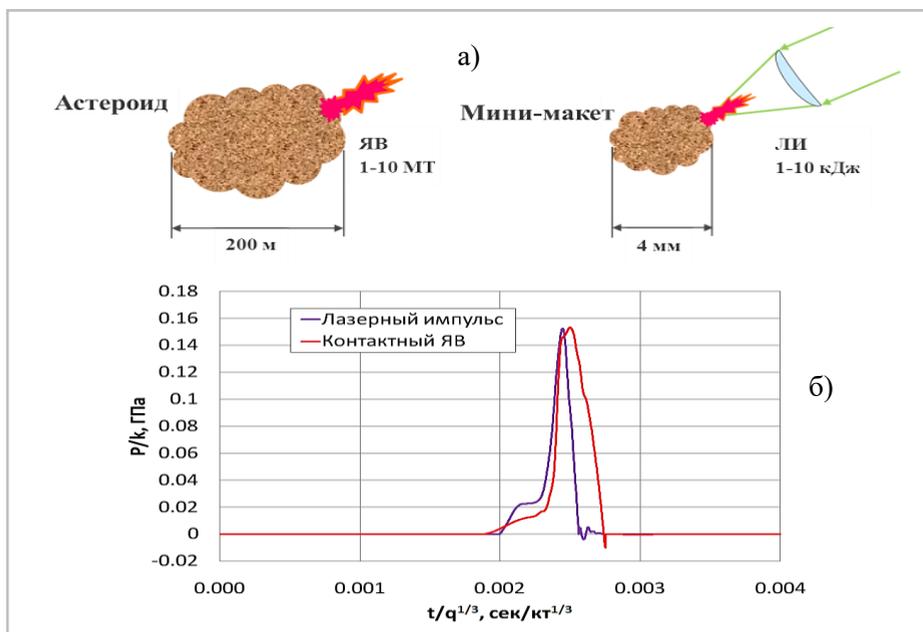


Рис. 4. Идея эксперимента по моделированию процессов разрушения астероида с использованием интенсивного излучения (а), моделирование процессов подобия в экспериментах с лазером и ядерным взрывом (б)

При изготовлении макетов было обеспечено их подобие составу, микро- и макроструктуре, прочностным характеристикам реальных объектов. Для натурных испытаний использовались также образцы метеоритов. В экспериментах применялись хондритные каменные, железные и ледяные образцы. В широком спектре размеров и форм получены данные по необходимой удельной энергии, которая должна быть доставлена к космическому объекту.

Современный этап. Российский мегаджоульный проект

Фактически установка «Луч» стала полигоном для отработки основных узлов будущей установки нового поколения и позволила уточнить ее параметры. После доработки проекта была увеличена до ~40 см апертура лазерного канала, а количество каналов составило 192. Была изменена геометрия облучения мишени. Вместе это позволило существенно увеличить энергию лазерного излучения на выходе установки и в камере взаимодействия и улучшило однородность облучения капсулы с ДТ топливом.

Важным отличием нового варианта установки от ее аналогов в США и Франции является наличие двух камер взаимодействия: основной сферической камеры диаметром 10 м, которая должна работать со всеми пучками, и вспомогательной камеры многофункционального исследовательского комплекса (МИК), работающей с 16 лазерными каналами при энергии излучения около 200 кДж. Камера оснащена генераторами магнитного поля.

В 2012 году начались работы по созданию установки. Сформирована широкая кооперация, в которую вошли ведущие организации ГК «Росатом», РАН, оптической и электронной промышленности.

Для проведения входного контроля оптических элементов, систем высоковольтной электроники, систем автоматического управления в 2014 году введен в эксплуатацию современный испытательный комплекс, обеспечивающий сквозной контроль и аттестацию всех составных частей установки. Запущено прецизионное мишенное производство, в том числе термоядерных мишеней.

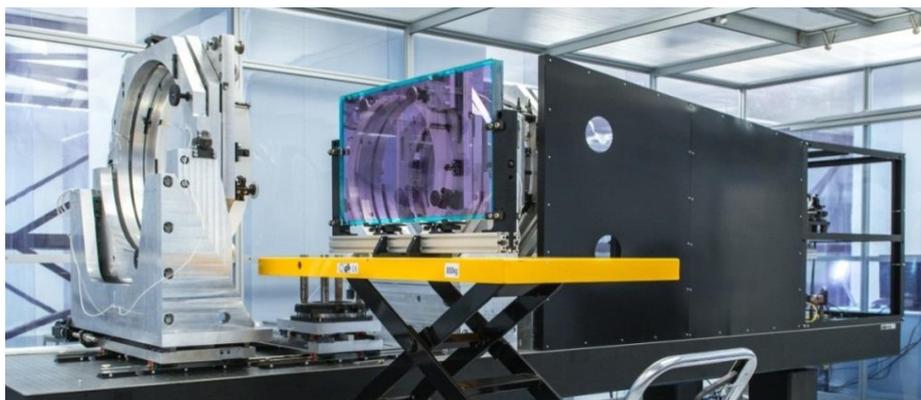


Рис. 5. Широкоапертурный интерферометр фазового сдвига совместной разработки ИПФ РАН и РФЯЦ-ВНИИЭФ класса точности $\lambda/1000$

Важным направлением исследований является разработка высокоточных инструментов диагностики. В частности, теневая фазовая интерферометрия плазменных объектов, обладающая высоким временным (несколько фс) и пространственным (несколько мкм) разрешением (рис. 5), позволяет диагностировать динамику сложных 3D плазменных объектов в режиме многокадровой съемки. Одновременно активно применяются интерферометрические методики ВИЗАР [33] и оптогетеродинная многоканальная методика PDV [34], обеспечившие регистрацию динамических процессов в лазерных мишенях (пример на рис. 6) с погрешностью измерений скорости менее 1%. Разработаны комплексы для измерения энергетических, спектральных и временных параметров рентгеновского поля и параметров разлета частиц, получаемых в результате протекания термоядерных реакций.

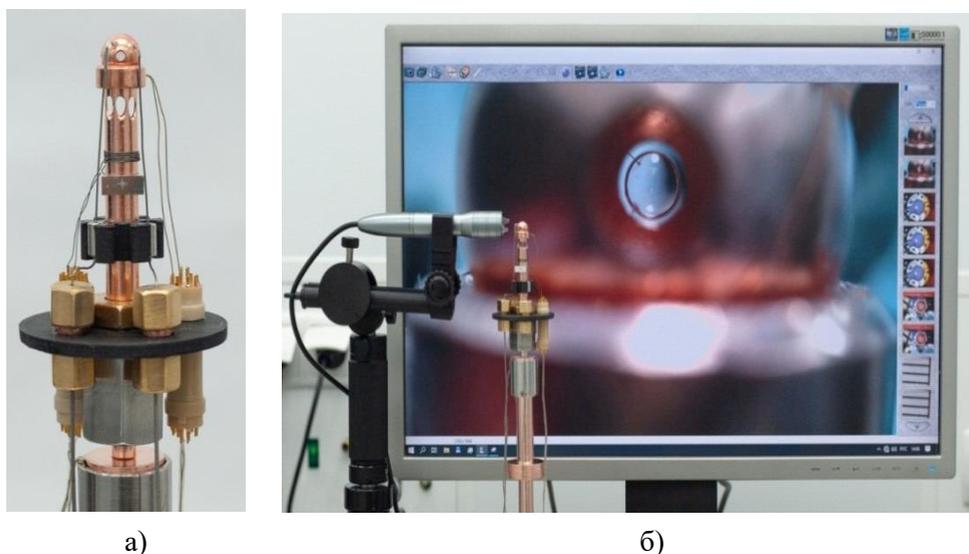


Рис. 6. Мишень непрямого облучения криогенного типа: общий вид(а), вид центральной капсулы с ДТ топливом внутри бокса-конвертора (б)

В конце 2020 года здание для размещения установки введено в эксплуатацию. Осуществлён монтаж стапеля, на котором монтируются лазерные модули. Вакуумные камеры взаимодействия установлены на место эксплуатации (рис.7). Введен в опытную эксплуатацию первый восьмиканальный модуль установки, на котором начаты эксперименты.



а)



б)

Рис. 7. Монтаж сферической вакуумной камеры диаметром 10 м (а), многофункциональная камера МИК (б)

Создание установок ультракороткой длительности излучения

В последние годы наблюдается стремительный прогресс в создании твёрдотельных лазерных систем с импульсами фемтосекундной длительности. В ведущих лазерных лабораториях созданы установки субпетаваттного и петаваттного уровней мощности [35]. При таких уровнях мощности в сфокусированном пучке достигается интенсивность до 10^{22} Вт/см², что на четыре порядка больше релятивистской интенсивности – интенсивности, при которой энергия колебания электронов в поле световой волны оказывается порядка энергии покоя. Такие релятивистские условия невозможно реализовать в лабораториях другими способами.

Появление нового инструмента привело к развитию целого ряда исследовательских направлений: генерация быстрых электронов и ионов, включая генерацию протонных пучков; генерация жёсткого рентгеновского излучения, инициирование ядерных реакций и др.

Разные научные группы проводят теоретические и экспериментальные исследования с целью определения возможности «быстрого» зажигания термоядерной мишени при одновременном воздействии лазерного излучения наносекундной и фемтосекундной длительности.

Основу короткоимпульсных систем составляет задающий генератор. Он создает лазерный импульс фемтосекундной длительности, энергия которого не превышает нескольких наноджоулей. Усилительная схема строится на основе растяжения импульса с использованием дифракционных решеток до наносекундной длительности, усиления и последующей компрессии к исходной форме импульса (при условии сохранения спектральной формы излучения при усилении) [36].

В ИПФ РАН для усиления излучения предложен способ параметрического преобразования света для создания комплексов такой импульсной мощности [37]. Импульс излучения усиливается в нелинейном анизотропном кристалле за счет перекачки энергии из волны накачки (в результате генерируется также холостая волна). Перекачка происходит в соответствии с условиями синхронизма в трехволновом взаимодействии.

Создано два комплекса петаваттного уровня мощности: Фемта (Саров) и Pearl (Н. Новгород) [38] (рис. 8).



Рис. 8. Установка Pearl

На установках проведен большой объем работ. В частности, в ИПФ РАН получены результаты по сверхкомпрессии лазерного импульса ультракороткой длительности. Для этого могут применяться методы обогащения спектра, в том числе и на финальной стадии – после компрессии излучения [39]. В ИПФ РАН для этого впервые применена тонкая кварцевая пластина (3 мм), нагружаемая лазерным полем мощностью 250 ТВт. Из-за фазовой самомодуляции в стекле и последующего отражения от дисперсионных зеркал получено 5-кратное укорочение импульса (с 70 пс до 14 пс) при минимальных потерях энергии (несколько процентов) [40].

Примером работ на установке Pearl являлись исследования плазменных течений в сильном магнитном поле для моделирования ряда астрофизических исследований [41]. Для формирования плазмы использовалось сфокусиро-

ванное на мишени излучение наносекундной длительности. Импульсное (несколько миллисекунд) магнитное поле амплитудой в десятки тесла формировалось токопроводящими катушками Гельмгольца. Динамика движения плазмы регистрировалась интерферометрическим способом с использованием импульсного излучения фемтосекундной длительности, что позволяло осуществлять диагностическую съемку с минимальной временной экспозицией и высоким пространственным разрешением.

Проведено исследование разных этапов взаимодействия с полем: первого, когда газодинамическое давление превышает магнитное, второго, когда давления примерно равны – это время развития неустойчивостей на границе области плазмы, и третьего, когда плазма вытесняется магнитным полем и формируется плоская геометрия течения плазмы, ориентированного продольно линиям поля.

На рис. 9 демонстрируется геометрия эксперимента и структура магнитно-ориентированного плазменного течения.

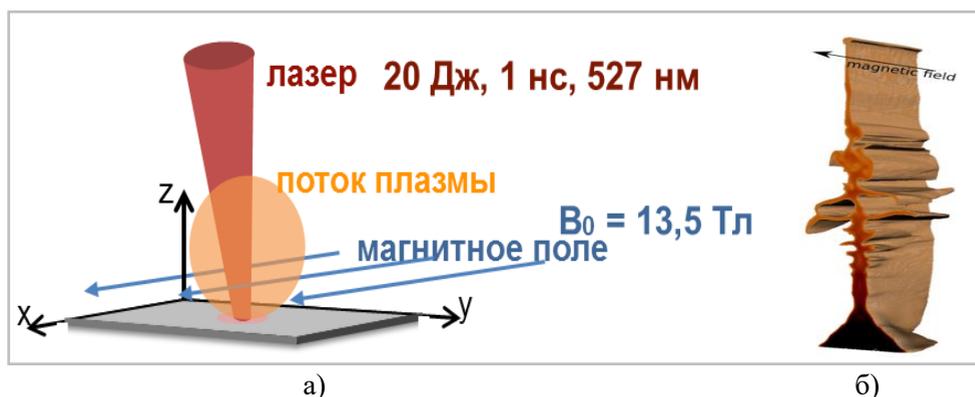


Рис. 9. Геометрия эксперимента (а), структура магнитно-ориентированного плазменного течения (б)

Результаты работ по созданию петаваттных лазерных комплексов в Сарове и Н. Новгороде были положены в основу проекта создания самого мощного в мире субэкзаваттного лазера XCELS, который включен Правительством РФ в число проектов класса мегасайенс, планируемых к реализации в текущем десятилетии. Установка будет иметь интенсивность облучения $> 10^{25} \text{ Вт/см}^2$. Научная программа работ является весьма амбициозной и имеет следующую перспективную повестку:

- создание сверхъярких источников в рентгеновском и гамма-диапазонах;
- создание компактных ускорителей электронов (до 100 ГэВ) и ионов (10 ГэВ)
- исследования экстремальных состояний в ультрарелятивистских полях;
- моделирование астрофизических и ранних космологических явлений;
- создание электромагнитных источников аттосекундной и субаттосекундной длительности;
- получение источника излучения с пиковой мощностью более 1 ЭВт;
- исследование пространственно-временной структуры вакуума;
- создание вещества и антивещества;
- возбуждение и диагностика внутриядерных процессов.

Перспективы развития

Локомотивом развития лазерных технологий с момента изобретения и во все времена являлась идея создания на их основе лазерной термоядерной или гибридной электростанции.

Важным шагом в этом направлении является создание установки, обеспечивающей одновременно высокую энергию излучения и частоту повторения импульсов. В мире разрабатываются проекты твердотельных лазерных систем с энергией импульса от 1 до 10 кДж в канале и частотой 10–20 Гц [42], однако, экспериментально достигнутые уровни энергии существенно ниже [43], а существующие установки с требуемыми энергиями импульсов не могут работать в частотном режиме.

Развитие технологий диодной накачки, криогенного охлаждения усилителей и адаптивного управления формой волнового фронта позволяют на основе новых физических принципов и конструкторских решений создать сегодня импульсно-периодический лазер требуемого класса. С этой целью ГК «Росатом» в 2019 году приступил к разработке установки для решения перспективных задач термоядерной/гибридной энергетики. Программа работ предполагает развитие ключевых технологий частотного канала, отработки концепции его построения и создание инфраструктуры. Проект реализуется на базе российских технологий и стимулирует развитие ряда сопряженных программ.

При проведении работ разрабатываются системы, способные работать в частотном режиме с высокой средней мощностью лазерного излучения, в том числе такие как: широкоапертурная ячейка Поккельса, вакуумный пространственный фильтр, адаптивная система устройства фазировки излучения каналов. Проводятся исследования в интересах развития технологий создания: источников диодной накачки с повышенной мощностью, керамических активных элементов Yb:YAG высокого оптического качества и большого размера, жидких охлаждающих сред для криогенного охлаждения активных элементов.

Проведен этап макетирования дискового усилителя – конструктивно главного и наиболее технически сложного элемента канала частотной установки. Испытаны системы диодной накачки и образцов активных сред из Yb:YAG керамики.

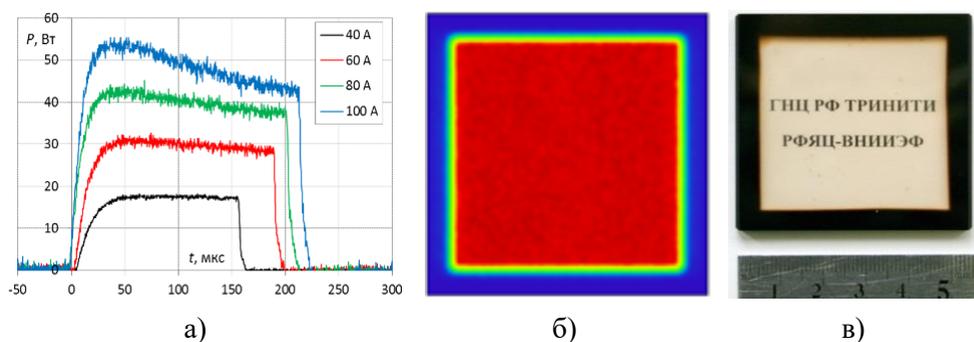


Рис. 10. Форма импульсного излучения накачки (а) и ее пространственное распределение (б) на экспериментальном образце из керамики (в)

Важнейшим направлением работ является подготовка квалифицированных кадров в области лазерно-физических исследований. Для решения этой задачи на базе НИЯУ-МИФИ с участием РФЯЦ-ВНИИЭФ, ИОФ РАН и ИПФ РАН активно реализуется новый проект по созданию лазерного центра «Эльф» [44]. В проекте используется оригинальная концепция последовательного усиления в режиме сильного насыщения, которая обещает существенное увеличение эффективности генерации энергии – на выходе 2-канальной усилительной установки энергия составит до 7 Дж/канал при апертуре пучка 22 см и длительности импульса излучения в единицы наносекунд. Одновременно, как показывают расчетные исследования,

ождается более чем двукратное улучшение (относительно систем с аналогичной плотностью энергии) качества излучения в ближней и дальней зонах. На установке впервые в современной практике будет реализована концепция нс, пс и фс опций по длительности импульсного излучения одновременно.

Заключение

Созданная в России лазерная стендовая база уникальна. ГК «Росатом» и РАН проводят обширную работу по созданию современных лазерных установок. Координация усилий для решения перспективных задач по их разработке обеспечила реализацию амбициозных проектов совместных фундаментальных и прикладных исследований. На их основе проводится подготовка высококвалифицированных специалистов в области лазерных технологий, физике плазмы и экстремального состояния вещества. Интенсивно развивается научно-исследовательская база ВУЗов.

Ввод российских установок класса мегасайенс в эксплуатацию обеспечивает возможности моделирования всех актуальных задач физики и термоядерной энергетики. Сопоставление полученной экспериментально информации с результатами расчетов по существующим и модернизированным программам позволяет оценить полноту физических моделей, на которых базируются расчетные методики, и точность математических алгоритмов и программ, реализующих их.

Литература

1. Charles H. Townes. A Century of Nature: Twenty-One Discoveries that Changed Science and the World – Chicago: University of Chicago Press, 2003.
2. Зуев В.С. Препринт ФИАН № 161. Москва, 1990.
3. E. Moses and C.R. Wuest, Fusion Sci. Technol., 47, 314, 2005.
4. Кормер С.Б., Кочемасов Г.Г., Куликов С.М. и др., ЖЭТФ, 82, 1079, 1982.
5. Борисов В.П., Бурцев В.В., Великанов С.Д. и др., Квантовая электроника, 23, 326, 1996.
6. Кириллов Г.А., Захаров Н.Г. Пособие по физике лазеров. – Саров: Издательство РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2020.
7. Адаменков А.А., Бакшин В.В., Богачев А.В. и др., Квантовая электроника, 37 (7), 601, 2007.

8. Попов Н.А., ВАНТ, серия: Математическое моделирование физических процессов, вып. 4, 53, 1992.
9. Басов Н.Г., Крохин О.Н., ЖЭТФ, 46, 171, 1964.
10. Nuckols J., Wood L., Thiessen A. et al., Nature, 239, 139, 1972.
11. Басов Н.Г., Данилов А.Е., Круглов Б.В. и др., Квантовая электроника, 9 (2), 395, 1982.
12. Басов Н.Г., Крохин О.Н., Склизков Г.В. и др., ЖЭТФ, 62(1), 203, 1972.
13. Аверьянов К.П., Авилов Ю.С., Александров В.В. и др., Proceedings of the XII ECLIM, Book of abstracts, 20, 1978.
14. Гашеев А.С., Зарецкий А.И., Кириллов Г.А. и др., Письма в ЖЭТФ, 7, 1368, 1981.
15. Андреев А.А., Анучин М.Г., Бородин В.Г. и др., ЖЭТФ, 95, 528, 1989.
16. Волвенко В.В., Зуев А.И., Иванов А.Ф. и др., Квантовая электроника, 10, 2350, 1983.
17. Анненков В.И., Багрецов В.А., Безуглов В.Г. и др., Квантовая электроника, 18 (5), 536, 1991.
18. LLE Review 1996, 64, 145, 1996.
19. LLE Annual Report 1998, 168, 1998.
20. Cable M.D., Hatchett S.P., Caird J.A. et al., Phys. Rev. Lett., 43, 2316, 1994.
21. Kochemasov G.G., Proceedings of the XXIII ECLIM, Book of abstracts, 17, 1994.
22. Силин В.П., УФН, 145, 225, 1985.
23. Campbell E.M., Hant J.T., Bliss E.S. et al., Rev. Sci. Instrum., 57, 2101, 1986.
24. Абзаев Ф.М., Бельков С.А., Бессараб А.В. и др., ЖЭТФ 114, 155, 1998.
25. Ильяев Р.И., Фортов В.Е. Вестник РАН, 81 (6), 509, 2011.
26. S.A. Bel'kov, A.V. Bessarab, V.A. Gaigash et al., Laser and Particle Beams 17 (3), 385, 1999.
27. Софронов И.Д., Бельков С.А., Винокуров О.А. и др., ВАНТ, серия: Математическое моделирование физических процессов, вып. 1, 8, 2000.
28. Andre M.L. Status of the LMJ project, Report at the Second Annual Conference Solid State Lasers for Application to ICF, 22 – 25 October, 1996.
29. Galakhov I.V., Garanin S.G., Eroshenko V.A. et al. Fusion Engineering and Design, 44, 51, 1999.
30. Зарецкий А.И., Ильяев Р.И., Кириллов Г.А. и др., Квантовая электроника, 35 (4), 299, 2005.
31. Bel'kov S.A., Derkach V.N., Garanin S.G. et al., Appl. Phys., 115, 033506-1, 2014.
32. Аристова Е.Ю., Аушев А.А., Баранов В.К. и др., ЖЭТФ, 153 (1), 157, 2018.
33. Celliers P.M., Bradley D.K., Collins G.W. Rev. Sci. Instrum., 75, 11, 2004.

34. Strand O., Goosman D., Martinez C. et al. *Rev. Sci. Instrum.*, 77 (8), 083108, 2006.
35. Danson C., Hiller D., Hopps N., Neely D. *High Power Laser Science and Engineering*, 3 (3), 1, 2015.
36. Strickland D. and Mourou G. *Opt. Commun.*, 56 (3), 219, 1985.
37. Зуев А.С., Гинзбург В.Н., Кочетков А.А. и др. *Квантовая электроника*, 47 (8), 705, 2017.
38. Lozhkarev V.V., Freidman G.I., Ginzburg V.N. et al. *Laser Physics Letters*, 4 (6), 421, 2007.
39. Хазанов Е.А., Миронов С.Ю., Муру Ж., *УФН*, 189, 1173, 2019.
40. Гинзбург В.Н., Яковлев И.В., Зуев А.С. и др., *Квантовая электроника*, 50 (4), 331, 2020.
41. Khiar B., Revet G., Ciardi A. et al. *Phys. Rev. Lett.* 123, 205001, 2019.
42. Moses E., Diaz de la Rubia T., Latkowski J.F. et al. *Fusion Science and Tech.*, 56 (2), 566, 2019.
43. Banerjee S., Mason P.D., Ertel K. et al. *Opt. Lett.*, 41 (9), 2089, 2016.
44. Derkach V.N., Garanin S.G., Belkov S.A. et al. *Proceedings of the XXXIV ECLIM, Book of abstracts*, 168, 2016.

Е.О. Адамов ¹, В.Г. Асмолов ², Л.А. Большов ³, В.К. Иванов ⁴

ДВУХКОМПОНЕНТНАЯ ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

Возможность создания ядерной энергетики (ЯЭ) была подготовлена академическими работами конца XIX и первой половины XX века, в том числе работами отечественных учёных А. Гамова, Я. Зельдовича, Д. Иваненко, И. Курчатова, К. Петржака, Г. Флёрва, Я. Френкеля, Ю. Харитона и других.

Однако именно перспектива создания ядерного оружия ускорила разработку ядерных реакторов. Первые реакторы, созданные в США (Chicago Pile-1, CP-1), где в 1942 г. впервые была получена управляемая цепная реакция, и их аналог Ф-1, созданный в 1946 г. в Лаборатории №2 АН СССР (ныне НИЦ «Курчатовский институт»), строились для отработки технологии и процессов получения оружейного плутония. Их опыт был использован для создания промышленных реакторов («В» в Хэнфорде, «А» на комбинате «Маяк», рис.1), которые решали задачи наработки оружейных изотопов Pu и T.

Работы по созданию атомной бомбы, развёрнутые в 1943 г. в рамках АН СССР, были резко активизированы в августе 1945 г. созданием Специального комитета, после взрыва первых американских бомб в Хиросиме и Нагасаки. Но уже в октябре 1945 г. П. Капица направляет в Первое главное управление (предшественник Минсредмаша и нынешнего «Росатома») при Спецкомитете записку «О применении внутриатомной энергии в мирных целях». И. Курчатов подтвердил возможность использования конструкции созданного с целью наработки плутония реактора «А» для производства тепловой и электроэнергии. Постановление Правительства о строительстве в СССР первой атомной электростанции (АЭС) было выпущено в мае 1949 г., т.е. за несколько месяцев до успешного испытания первого ядерного заряда в СССР.

Разработанные будущим академиком Н. Доллежалем, с использованием данных советской разведки, принципиальная схема и конструкция уран-графитового водо-охлаждаемого реактора легли в основу одной из двух ветвей

¹ Научный руководитель проектного направления «Прорыв» и НИКИЭТ им. Н.А. Доллежаля, профессор.

² Советник генерального директора Госкорпорации «Росатом», профессор.

³ Научный руководитель ИБРАЭ РАН, академик РАН.

⁴ Главный радиоэколог проектного направления «Прорыв», член-корреспондент РАН.

развития ЯЭ в СССР. Первая АЭС в Обнинске (1954 г.), Сибирская АЭС (1958 г.) на комбинате СХК рядом с Томском положили начало каналному направлению реакторостроения в нашей стране, затем продолженному серией АЭС с реакторами РБМК.



Рис. 1. Здание реактора «А»

Вторая ветвь ЯЭ, корпусные реакторы, появилась также благодаря работам по оборонной тематике. Тем же Н. Доллежалем первый корпусной реактор ВМ-А (рис. 2) был спроектирован для атомной подводной лодки (АПЛ), вошедшей в строй в 1958 г. Развитие этого направления в рамках ВМФ сопровождалось переходом от петлевых конструкций реакторных установок (РУ) к блочным конструкциям со снижением их массы, габаритов и стоимости.

Настоящим прорывом было предложение Н. Доллежала по конструкции моноблочной установки МБУ-40 (рис. 3), намного превосхитившей перспективные решения в ЯЭ. Реализованные для оборонных задач РУ интегрального типа стали прообразом для многих разрабатываемых в мире реакторов, например реактора БН-1200 (рис. 4). Преимущества интегральной конструкции РУ будут рассмотрены ниже.

Современная ЯЭ РФ иллюстрируется картой расположения действующих и строящихся энергоблоков АЭС России (см. рис. 5). Её характеризует 12,8% установленной мощности генерирующих электроэнергию станций и почти 19% (в 2019 г.) производимой электроэнергии. Выработка электроэнергии в России в 1985–2019 гг. (млрд кВт·ч) иллюстрируется на рис. 6.

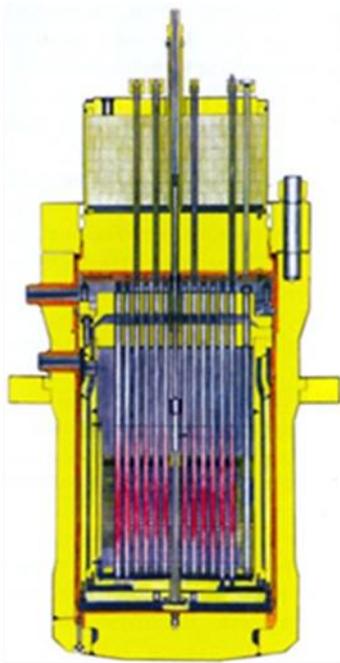


Рис. 2. Первый корпусной реактор ВМ-А

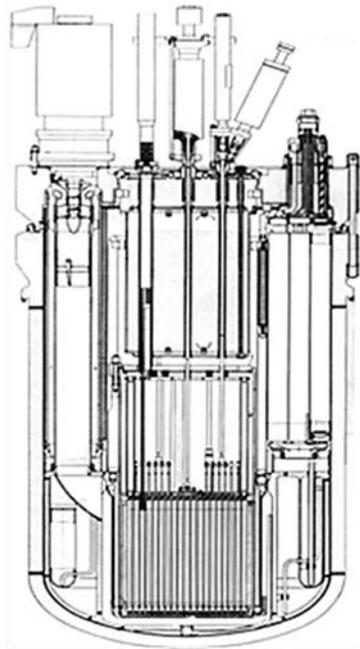


Рис. 3. Конструкция моноблочной установки МБУ-40

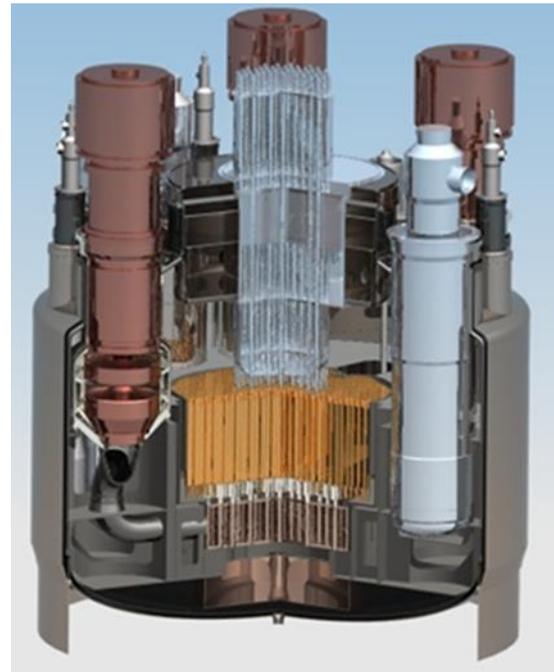


Рис. 4. РУ БН-1200



Рис. 5. Карта расположения действующих и строящихся энергоблоков АЭС России

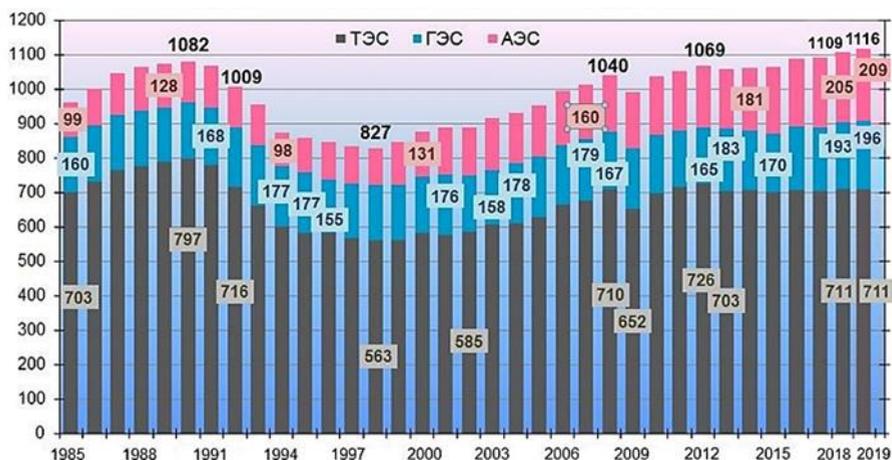


Рис. 6. Выработка электроэнергии в России в 1985–2019 гг. (млрд кВт·ч)

Этот рисунок характеризует динамику развития ЯЭ в нашей стране, где общее электропроизводство вот уже 30 лет застыло в диапазоне 1000–110 млрд кВт·ч. В 2000 г., когда и этот уровень опустился ниже 900 млрд кВт·ч, ЯЭ вышла на уровень 131 млрд кВт·ч, превысив наивысший уровень производства в СССР (128 млрд кВт·ч в 1998 г.).

Государственная ЯЭ стала первой в России отраслью, восстановившей потенциал после сокрушительного падения всех показателей экономики в 90-е годы. Для отрасли производства металлов, нефтяной и других отраслей, попавших в частные руки, на это потребовались ещё 5–10 лет. В условиях стагнации экономики, обусловившей отсутствие потребностей в развитии

производства электроэнергии, ЯЭ в 2019 г. увеличила производство электроэнергии до уровня 209 млрд кВт·ч. Электрогенерация АЭС в Европейской части страны достигает почти 40%. В 2020 г. произведено около 214 млрд кВт·ч электроэнергии.

Продукция атомной отрасли является ключевой частью высокотехнологичного экспорта: 10-летний портфель зарубежных заказов Госкорпорации «Росатом» превышает \$130 млрд в то время, как, например, аналогичный портфель по экспорту вооружения составляет примерно \$50 млрд.

Лидирующие позиции РФ в экспортном потенциале ЯЭ достигнуты в жесткой конкуренции с США, Францией, Японией и Канадой. В то же время на мировые рынки активно выдвигаются новые игроки из Китая, Южной Кореи, предлагающие аналогичные продукты по более низкой цене, сопровождая свои предложения дешёвыми кредитами.

В этих условиях удержание мирового лидерства невозможно без развития новых технологий, решения системных проблем существующей ЯЭ:

- тяжёлые аварии – отказ ФРГ, Швейцарии, Бельгии и, возможно, Южной Кореи от ЯЭ;
- низкая эффективность использования добываемого природного урана – 0,7% от сырья (содержание ^{235}U);
- отложенная проблема отработанного ядерного топлива (ОЯТ) – накопление и отсутствие экологически приемлемого обращения с долгоживущими высокоактивными отходами (ДВАО, младшие актиноиды (МА) и др.);
- риск переключения делящихся материалов, обращающихся в ядерном топливном цикле (ЯТЦ), на военные или террористические цели;
- опасность утраты конкурентоспособности.

Развитию новой технологической платформы ЯЭ положила начало Федеральная целевая программа, принятая Правительством в 2010 г., в рамках которой в 2013 г. было образовано проектное направление «Прорыв». Целью работ по этому направлению является выстраивание наряду с технологиями существующей ЯЭ, пока использующей открытый ЯТЦ, реакторы на тепловых нейтронах, новой ветви ЯЭ на базе реакторов на быстрых нейтронах, при замыкании ЯТЦ (см. рис. 7).

Двухкомпонентную ЯЭ следует рассматривать как основную ядерную

технологии на период нынешнего столетия. Её развитие позволит сократить накопление ОЯТ, снизить объёмы радиоактивных отходов (РАО), повысить эффективность использования уранового сырья, повысить экологические показатели и сохранить конкурентоспособность ЯЭ по сравнению с другими генерациями.

Для существующей и основной из используемых в настоящее время технологий водо-водяных реакторов (ВВЭР) предусматриваются два основных этапа развития. Первый из них – ВВЭР-С, реактор со спектральным регулированием, управлением реактором за счёт изменения водно-уранового соотношения, при использовании вытеснителей по ходу топливной кампании. Такие реакторы позволяют повысить коэффициент воспроизводства Pu до 0,7, снизить потребление природного урана примерно на 30%, полностью загрузить активную зону смешанным уран-плутониевым топливом. За счёт исключения спецкорпуса (необходимого при борном регулировании) и использования некоторых технологических систем можно снизить капитальные затраты на 10–15%. Исключение Zr , как материала оболочек ТВЭ, снимает проблему водородных взрывов, имевших место на РУ АЭС в Фукусиме.

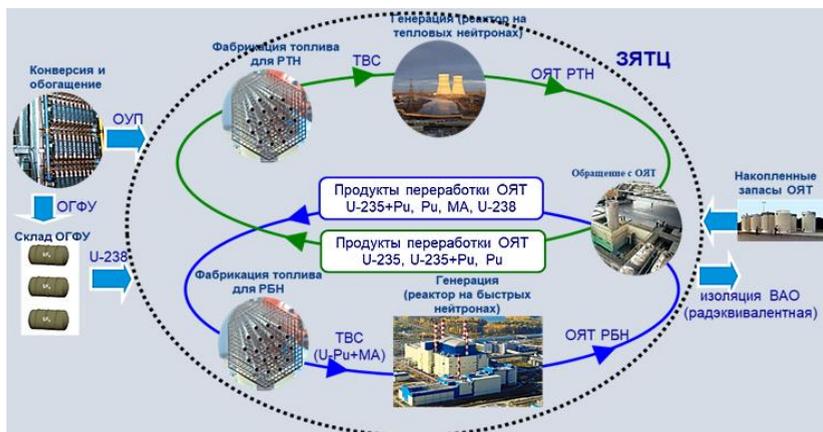


Рис. 7. Двухкомпонентная атомная энергетика (система РБН и РТН)

На втором этапе – ВВЭР-СКД (сверхкритического давления), предусматривается переход к быстрому спектру нейтронов и достижение, как и у всех таких реакторов, самообеспечения топливом (~1, вместо 0,3–0,5).

Теплотехнические параметры, в том числе к.п.д. ~ 46% (вместо 36% в АЭС-2006) выравниваются с характеристиками современной тепловой

энергетики. Внедрение рассматриваемых улучшений технологии ВВЭР связано с решением проблем материаловедения.

Перспективы реакторов на быстрых нейтронах и предполагаемых их преимуществ (в плане безопасности) связаны с уже упоминавшимися конструкциями интегральных реакторов, в корпусе которых сосредоточены все элементы первого контура, парогенераторы и системы аварийного отвода тепла. Благодаря такой конструктивной схеме, предложенной ещё Н. Доллежалем, устранение потерь теплоносителя и теплоотвода от активной зоны детерминистически исключает такие тяжёлые аварии, которые произошли на АЭС Три-Майл-Айленд (Three Mile Island, США, 1979 г.), АЭС Фукусима-1 (Япония, 2011 г.).

Указанная конструкция использована, например, в РУ БН-1200 (рис. 4). Для исключения вероятности реактивной аварии, имевшей место на Чернобыльской АЭС в 1986 г., предлагается использовать равновесное топливо, применение которого позволяет избежать избыточного запаса реактивности в РУ, а следовательно, детерминистически исключить и такую аварию. В равновесном топливе выравнивается сжигание одних (U или Pu) изотопов и наработка плутония, что позволяет рассчитывать на прохождение любых теоретически возможных аварий без необходимости эвакуации, а тем более отселения окружающего населения и вывода из хозяйственного оборота больших земельных территорий а следовательно, и без значительного экономического ущерба.

Таким топливом может стать смешанное нитридное уран-плутониевое топливо, первенство в разработке технологии и обосновании работоспособности которого при реакторных испытаниях (до 9% выгорания тяжёлых атомов) принадлежит России.

На рис. 8 показан ход реактивности за кампанию в РУ БН-1200 при использовании окисного (MOX) и нитридного топлива. Анализ этого рисунка свидетельствует об очевидном преимуществе более плотного и теплопроводного нитридного топлива.

Замыкание ЯТЦ позволяет за счёт трансмутации наиболее долгоживущих изотопов реализовать т.н. радиационно-равновесное обращение с РАО, при котором через 300–500 лет, в зависимости от степени очистки от МА, достигается радиационное равновесие добываемого уранового сырья и захораниваемых отходов. При всех деталях такого подхода, обсуждаемых

специалистами, очевидно, что довод о сохранении неизменным радиационного баланса Земли может оказаться решающим для общественного признания ЯЭ ключевой среди других «зелёных» генераций.

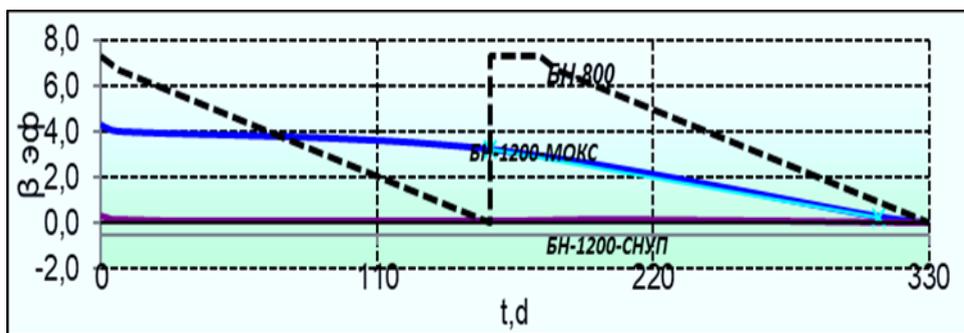


Рис. 8. Ход реактивности за кампанию в РУ БН-1200 при использовании окисного (МОХ) и нитридного (СНУП) топлива

Россия выиграла соревнование с Францией в последовательном развитии линии реакторов на быстрых нейтронах (РБН): от БР-5 в 1959 г., до БН-800 в 2015 г., последовательно наращивая мощности и осваивая физику РБН и технологии натриевого теплоносителя. Благодаря этим работам РФ остаётся лидером тематики РБН в мире, хотя в настоящее время ею активно занимаются Китай, Индия.

Сохраняя лучшие достижения в области РБН с натриевыми теплоносителями и окисным топливом, РФ в настоящее время перехватывает лидерство Westinghouse, по проектам или лицензиям которого создана большая часть АЭС в мире. В 2015 г. Westinghouse объявляет, что следующим поколением РУ будут РБН, причем не с металлическим топливом, которое многие годы в США рассматривалось как перспективное для РБН, а со смешанным нитридным уран-плутониевым топливом, а также со свинцовым теплоносителем. За исключением металло-бетонного корпуса, на который наши конкуренты не решились, это те же конструктивные подходы, что и в отечественной разработке РУ БРЕСТ (рис. 9).

Это позволяет говорить о перехвате первенства у американцев в развитии новой технологической платформы ЯЭ. Опытнo-демонстрационный комплекс, включающий топливное производство, энергоблок (ЭБ) БРЕСТ и модуль переработки ОЯТ, соответствующий подходам новой технологической платформы, сооружается на площадке Сибирского химического комбината:

от первой Сибирской АЭС до перспективной АЭС с пристанционным ЗЯТЦ (рис. 10).

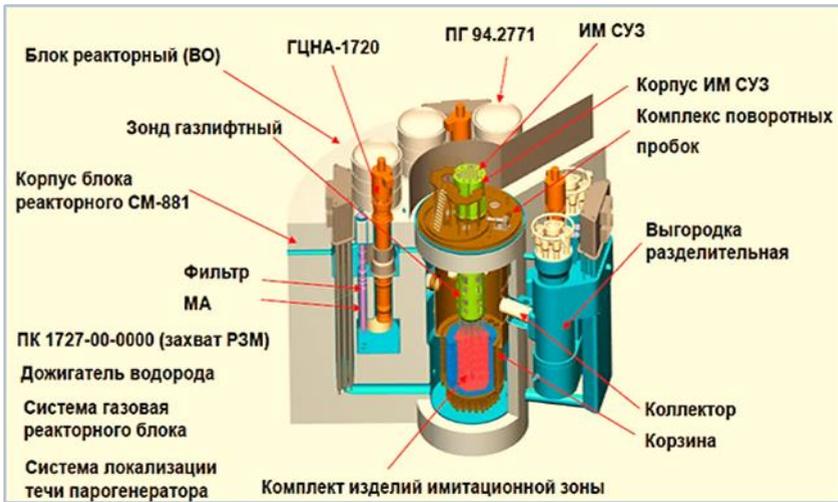


Рис. 9. РУ БРЕСТ-ОД-300



Рис. 10. Перспективная АЭС с пристанционным ЗЯТЦ

Экономика ЯЭ всегда отличалась высокой капиталоемкостью, однако выигрывала в стоимости производимых электричества и тепла, поскольку, в отличие от органической генерации, её топливная составляющая былакратно ниже.

Проектные изменения, обусловленные требованиями безопасности после тяжёлых аварий, поставили ЯЭ на грань конкурентоспособности. Новые проекты АЭС с тепловыми и быстрыми реакторами могут сохранить конкурентоспособность с основными пока конкурентами (парогазовыми установками) при условии, что цена не будет слишком высокой. Так, при нулевой ставке дисконтирования LCOE АЭС любого типа отличаются высокой конкурентоспособностью (рис. 11), которая сохраняется при ставке дисконтирования около 5%. Для всех капиталоемких объектов в мире большие требования к стоимости не предъявляются и понятно, что, например, государство выигрывает, предоставляя для строительства АЭС в РФ или за рубежом деньги бюджетные или из фонда национального благосостояния, по сравнению с размещением их в американские или европейские государственные ценные бумаги.



Рис. 11. Потенциал обеспечения конкурентоспособности двухкомпонентной ЯЭ (LCOE энерготехнологий, отн. ед.)

При разработке объектов ЯЭ и ЯТЦ активно используются методы компьютерного расчёта и моделирования. Первоначальную базу таких расчётов в основном составили программы, разрабатывавшиеся в ИПМ РАН и Физико-энергетическом институте под руководством академика Г. Марчука. В настоящее время лидером таких разработок стал ИБРАЭ РАН, под руководством академика РАН Л. Большова консолидирующий разработки как своих специалистов, так и институтов РАН, Росатома и университетов.

Первоначально все программы разрабатывались исключительно для РУ, в то время как за последнее время созданы коды для решения задач ЯТЦ. Сравнение кодов (см. рис. 12) демонстрирует, как большую точность

отечественных разработок, так и существенно меньшее время на создание импортозамещающих кодов. Российский код «Нострадамус» продемонстрировал великолепные результаты при прогнозировании переноса в атмосфере радиоактивности при аварии на фукусимской АЭС в 2011 г.

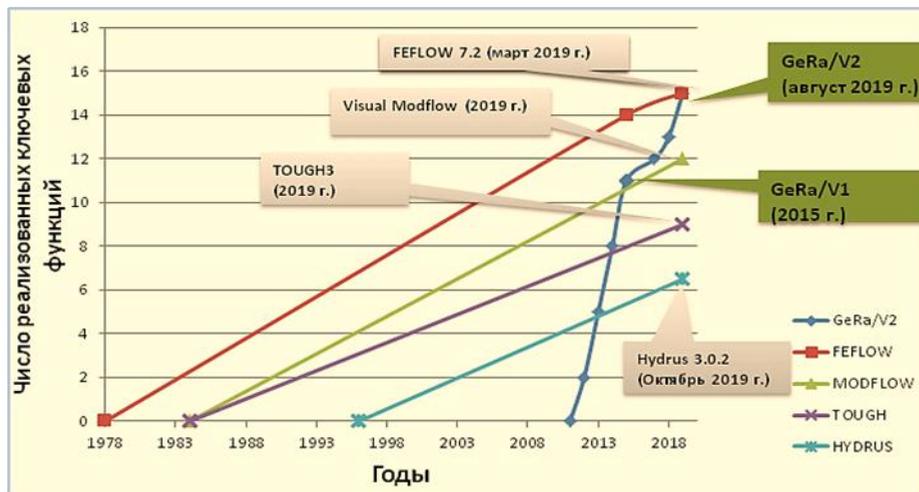


Рис. 12. Темпы разработки кода GeRa в сравнении с зарубежными аналогами

Цифровизация, о которой в настоящее время так много говорят, внедрена в разработки ядерных объектов с 50-х годов: от использования клавишных вычислительных машин, до современных мощных вычислителей. Весь путь от НИОКР и до вывода объектов ЯЭ из эксплуатации сопровождается созданием цифровых двойников и моделированием работы объектов в условиях нормальных штатных режимов и отклонений от них, вплоть до постулирования тяжёлых аварий (рис. 13).

Уникальным достижением академической науки стало дополнение к обоснованию радиационно-эквивалентного обращения с РАО, о котором выше шла речь. Под руководством члена-корреспондента РАН В. Иванова показано, что онкологическое равновесие, т.е. риск онкологических заболеваний от РАО и уранового сырья, при ЗЯТЦ достигается ещё быстрее, примерно через 100 лет (рис. 14).

Президиумом НТС «Росатома» в конце 2018 г. одобрена Стратегия развития ЯЭ в РФ, предусматривающая к концу столетия выход на мощность АЭС в диапазоне 70–90 ГВт.



Рис. 13. Цифровые решения в атомной энергетике – сфера и опыт применения

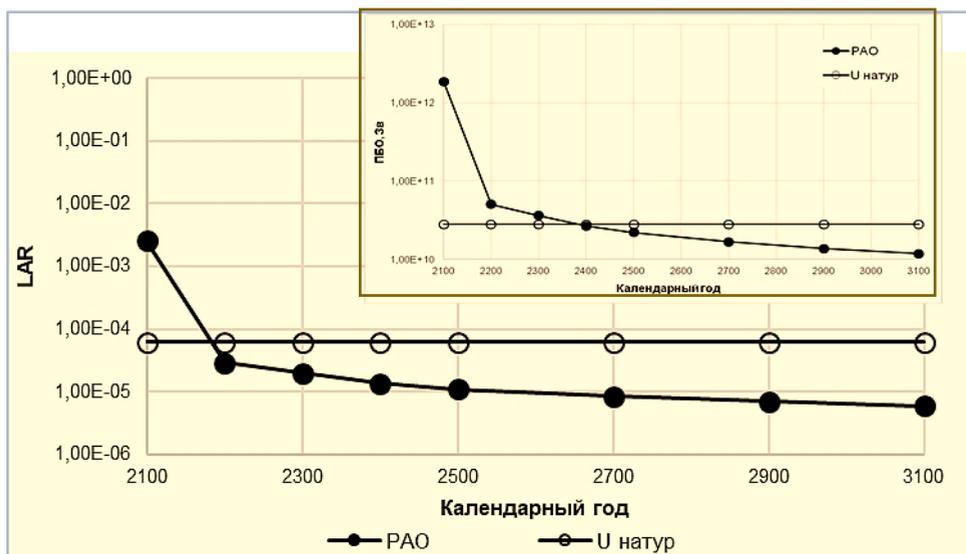


Рис. 14. Радиологическая эквивалентность по канцерогенному риску достигается через 100 лет выдержки

При этом неопределённость связана с тем, что не все преимущества РБН в настоящее время доказаны. Поэтому при задержке с этим, возможно, определенную нагрузку на некоторое время придётся взять на себя РУ на тепловых нейтронах с теми усовершенствованиями, о которых речь шла выше.

В любом случае, уже сейчас очевидно, что ЯЭ, свободная от перечисленных выше проблем, может стать базовым элементом экологически чистой энергетики, основным элементом «зелёного квадрата».

Мы рассчитываем, что, как и в предыдущие годы, развитие ЯЭ будет идти при тесном взаимодействии предприятий Госкорпорации «Росатом», РАН и НИЦ «Курчатовский институт».

Б.Ф. Мясоедов¹, С.Н. Калмыков², А.Ю. Шадрин³

СТАНОВЛЕНИЕ РАДИОХИМИИ КАК САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ НАУКИ. ЭТАПЫ РАЗВИТИЯ РАДИОХИМИИ

В отличие от любых других наук, радиохимия, как и другие «ядерные» науки (ядерная физика, радиационная химия, радиобиология и пр.), имеет не только год, но даже месяц и число своего рождения. В марте 1896 года Анри Беккерель на заседании Парижской Академии наук докладывал [1] о своих опытах с кристаллами двойного сульфата калия и уранила, положивших начало эры радиоактивности. Впоследствии наблюдаемое Беккерелем излучение, испускаемое этим веществом, было названо, по предложению Марии Кюри, радиоактивным, а само явление – радиоактивностью.

С момента исторических опытов Беккереля началось бурное развитие исследований радиоактивности. В 1898 г. супруги Кюри сообщили об открытии нового радиоактивного элемента – полония [2], названного в честь родины М. Кюри – Польши, а в декабре того же года второй радиоактивный элемент – радий [3]. За эти работы Пьеру Кюри, Марии Кюри и Анри Беккерелю в 1903 г. была присуждена Нобелевская премия по физике.

Вскоре была открыта радиоактивность тория, из урановой руды был выделен актиний [4], а в 1900 году последовало открытие Э. Резерфордом эманации тория [5], а Э. Дорном – эманации радия [6]. В 1903 году Резерфорд и Содди пришли к заключению, что атомы радиоактивных элементов претерпевают самопроизвольные превращения: одни элементы по цепочке распадов превращаются в другие, и это превращение сопровождается радиоактивным излучением.

К концу первого десятилетия XX века было известно уже множество радиоактивных элементов, и встал вопрос об их размещении в таблице Менделеева. В 1910 году по предложению Содди был введен термин изотоп –

¹ Научный руководитель Межведомственного центра аналитических исследований в области физики, химии и биологии при Президиуме РАН, советник РАН, академик РАН.

² Декан химического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, член-корреспондент РАН.

³ Научный руководитель – главный технолог объединенного проекта по разработке базовых технологий переработки отработанного ядерного топлива и обращения с радиоактивными отходами ИТЦП «Прорыв», доктор химических наук.

разновидность атомов какого-либо химического элемента с одинаковым атомным номером (которые, соответственно, располагаются в одной ячейке таблицы Менделеева), но при этом имеют разные массовые числа.

Эти открытия на пороге XX века в значительной мере определили не только пути дальнейшего развития естествознания, но и человеческой цивилизации в целом. Одним из первых значение открытия радиоактивности понял В.И. Вернадский. В своем историческом выступлении на заседании Академии наук 29 декабря 1910 г. он сказал: «...теперь перед нами открываются в явлениях радиоактивности источники атомной энергии, в миллионы раз превышающие источники сил, какие рисовались человеческому воображению» [7].

Существенный вклад в изучение радиоактивности внесли и русские ученые [8]. Так, профессор Московского университета А.П. Соколов разработал метод определения радия по выделяющемуся радону. Этот метод находит практическое применение и в наше время. Г.Н. Антонову принадлежит честь открытия в 1911 г. тория-231, продукта распада в естественном радиоактивном семействе урана-235. Интенсивно проводилось изучение радиоактивности отечественных минералов, минеральных вод и грязей (И.А. Антипов, Е.С. Бурскер, А.П. Грузинцев, П.П. Орлов, А.П. Соколов, Н.А. Умов и др.). Параллельно шло изучение химии и превращений химических элементов. В 1897–1907 гг. П.Г. Меликов и Л.В. Писаржевский получают надурановую кислоту, С. Лордкипанидзе – фторнадурановую кислоту, Л.А. Чугаев и Н.А. Орлов – галогениды, сульфаты и оксалаты четырехвалентного урана, А.М. Васильев синтезирует гидрат нитрата уранила.

Безусловно, самая большая заслуга в развертывании комплексных исследований в области радиоактивности в России принадлежит В.И. Вернадскому. Его усилиями в 1915 г. была организована Радиологическая лаборатория при Академии наук, а в 1922 г. создан Радиевый институт. Он стал первым директором института, а его заместителем и руководителем химического отдела В.Г. Хлопин – основоположник русской радиохимии, создатель основных технологических процессов извлечения радия из природных руд России. Под его руководством был организован технологический процесс переработки радиоактивных руд, и к 1 декабря 1921 г. были получены первые отечественные препараты радия.

Новый этап в развитии радиохимии был обусловлен открытием искусственной радиоактивности (Ирен и Фредерик Жолио-Кюри, 1934 г.). Этому событию предшествовало открытие нейтрона (Дж. Чедвик, 1932 г.). Благодаря ему в руках экспериментаторов появился новый инструмент – проводились многочисленные эксперименты по облучению нейтронами различных веществ, в том числе урана с целью получения новых трансурановых элементов (Э. Ферми). Однако результаты экспериментов по облучению урана нейтронами на тот момент объяснить не удалось, и лишь в 1938 году О. Ган и Ф. Штрассман открыли процесс деления ядер, а О. Фриш и Л. Мейтнер дали физическое объяснение этого процесса. Фактически с этого открытия начался этап в развитии «ядерных» наук, связанный с созданием ядерного оружия.

В 1940 году путем облучения урана нейтронами был получен нептуний – первый трансурановый элемент, а в 1941 году облучением урана дейтронами на циклотроне был получен ^{238}Np , который путем бета-минус распада превращался в плутоний-238.

Важнейшие задачи, которые решались в этот период радиохимиками, были связаны с изучением химических свойств искусственно полученных элементов, созданием технологических методов переработки облученного урана, глубокой очистки делящихся изотопов.

Первое испытание ядерного боезаряда было произведено в США в июле 1945 года, а меньше чем через месяц японские города Хиросима и Нагасаки подверглись ядерной бомбардировке. В августе 1949 года СССР прервал ядерную монополию США, проведя испытание ядерной бомбы РДС-1.

Значительным результатом в изучении химических свойств актинидов явилось открытие Н.Н. Кротом семивалентного состояния у плутония, нептуния и америция [9], разработка методов стабилизации четырехвалентного состояния окисления у америция [10] и установление возможности существования некоторых из трансурановых элементов в более низших состояниях окисления, чем трехвалентное [11].

В области изучения окислительно-восстановительных реакций актинидов отечественная радиохимия занимает ведущее место в мире. Большой вклад в изучение окислительно-восстановительных реакций ионов урана, нептуния, плутония, а также некоторых продуктов деления (технеций, родий, рутений, палладий) в различных водных растворах внес В.С. Колтунов. Им совместно с

учениками было изучено более семидесяти окислительно-восстановительных реакций, в частности, восстановление ионов плутония и нептуния железом (II), ураном (IV), ванадием (IV), пероксидом водорода, гидразином, гидроксиламином, аскорбиновой, сернистой и азотистой кислотами, окисление урана (IV), ионов нептуния и плутония железом (III), ванадием (V), ионами марганца, азотной и азотистыми кислотами, реакции диспропорционирования ионов плутония и нептуния и многие другие [12].

Новым направлением является исследование редокс-реакций нептуния и плутония в растворах три-н-бутил фосфата. Полученные результаты стали основой создания нового принципа разделения урана, нептуния и плутония в ПУРЕКС-процессе.

Окислительно-восстановительные реакции актинидов используются в технологическом способе выделения урана и плутония из облученного в реакторе урана – в ПУРЕКС-процессе [13]. Этот процесс основан на жидкостной экстракции урана (VI) и плутония (IV) из водных растворов три-н-бутил фосфатом в алифатических растворителях. Отделение плутония от урана достигается восстановлением плутония (IV) (обычно с помощью U(IV), Fe(II) или электрохимически) до плутония (III), который не экстрагируется раствором три-н-бутил фосфата. ПУРЕКС-процесс остается во всем мире основным способом переработки отработавшего ядерного топлива (ОЯТ).

Создание отечественной атомной промышленности началось в середине 40-х годов под руководством И.В. Курчатова, наделенного исключительными полномочиями. Перед радиохимиками страны были поставлены две основные задачи: разработка гидрометаллургической технологии выделения, концентрирования и аффинажа урана, извлекаемого из отечественных руд, и разработка технологии выделения из облученного урана плутония-239 для создания атомного оружия. Первая задача в 1950 г. была поручена Всесоюзному научно-исследовательскому институту химической технологии (ВНИИХТ).

Проблему получения плутония вначале решали с использованием осадительного метода, разработанного учеными Радиевого института АН СССР под руководством акад. В.Г. Хлопина. Для проверки технологических параметров этого метода и наработки весовых количеств плутония во Всесоюзном научно-исследовательском институте неорганических материалов (ВНИИНМ) была создана полупромышленная установка У5, на

которой в середине 1945 г. был выделен из облученного урана первый в СССР и Европе концентрат плутония, а в конце 1948 г. получены весовые количества (300 мг) плутония нужного качества. Необходимо отметить, что на установке У5 работали, проходили стажировку и учебу многие радиохимики различных научно-исследовательских институтов и комбината № 817.

В 1949 г. в г. Озерске (Челябинск-40) на комбинате № 817, который впоследствии был преобразован в ПО «Маяк», был запущен первый радиохимический завод, функционирующий на основе осадительной технологии.

С середины пятидесятых годов при тесном сотрудничестве специалистов ВНИИНМ, ВНИИХТ, Радиевого института и ПО «Маяк» проводились исследования по созданию экстракционного метода переработки облученных урановых блоков с использованием три-н-бутил фосфата и новых сорбентов. В результате этих работ была создана оригинальная экстракционно-сорбционная технология, успешно внедренная на заводе в 1976 г.

Проблема обеспечения надежным аналитическим контролем новых технологий производства сверхчистого урана и плутония решалась под руководством ближайшего сподвижника И.В. Курчатова – академика А.П. Виноградова.

Усилия радиохимиков-аналитиков ГЕОХИ АН СССР, ВНИИНМ, ПО «Маяк» и Радиевого института были направлены в то время на изучение химических свойств малоизвестных тогда нептуния и плутония, разработку эффективных методов их выделения и глубокой очистки от осколочных элементов. Создавались высокочувствительные методы их определения в растворах сложного состава: радиометрические, спектральные, электрохимические, люминесцентные и др.

Не менее важной являлась проблема контроля за содержанием микропримесей в металлическом уране на уровне до 10^{-5} – 10^{-4} %. С этой целью была выполнена работа по повышению чувствительности прямых методов определения примесей (главным образом спектральных и электрохимических), одновременно разрабатывались экстракционные и сорбционные методы концентрирования. Результаты этих работ обобщены А.П. Виноградовым в докладе «Физико-химические методы контроля производства урана» на первой Международной конференции по мирному использованию атомной энергии в 1955 г. [14].

Технологии и инженерные решения, которые использовались в оружейных проектах как СССР, так и США, применялись практически одновременно в мирном атоме – для создания ядерной энергетики. Промышленное освоение ядерной энергии началось с момента пуска в 1954 г. в СССР первой атомной электростанции мощностью 5 МВт (эл.).

В 2019 году в мире насчитывалось 449 действующих ядерных энергетических реакторов в 34 странах мира, еще 54 реактора строились [15]. Согласно прогнозам МАГАТЭ, к 2030 году рост в секторе ядерной энергетики составит от 17% (по пессимистичному сценарию) до 94% (по оптимистическому сценарию). В России действует 11 АЭС с 38 энергоблоками общей мощностью около 31 ГВт, что составляет около 13% от всей производимой в стране электроэнергии.

Проблема радиоактивных отходов

Одним из факторов, негативно влияющих на дальнейшее развитие ядерной энергетики, является проблема обращения с радиоактивными отходами (РАО), образующимися на всех стадиях ядерного топливного цикла (ЯТЦ). Различают две принципиальных стратегии – открытый ЯТЦ и замкнутый ЯТЦ.

Согласно первой из них, принятой в США, Швеции, Финляндии, Швейцарии, ОЯТ не перерабатывают, а хранят в специальных хранилищах с возможностью переработки или окончательного геологического захоронения в будущем. В мире уже накоплено более 200 тыс. тонн ОЯТ, которое хранится до принятия окончательного решения о его судьбе (в мире в настоящий момент нет ни одного лицензированного глубинного геологического хранилища ОЯТ). При этом ежегодно количество ОЯТ увеличивается примерно на 8–10 тыс. тонн [16].

В других странах с развитой ядерной энергетикой: Франции, Великобритании, Японии и России (опытные заводы имеются в Китае и Индии) ОЯТ подвергают переработке с экстракционным выделением урана и плутония в ПУРЕКС-процессе и последующим отверждением жидких РАО.

Заключительной стадией замкнутого ЯТЦ является глубинное геологическое захоронение РАО в отвержденном виде. Высокорадиоактивные отходы (ВАО) после переработки ОЯТ, как правило, представляют собой растворы и пульпы, содержащие продукты деления – радионуклиды Cs, Sr, Zr, Tc, Mo, Ru,

I, РЗЭ и радионуклиды, образующиеся при распаде этих продуктов деления, активированные продукты коррозии (радионуклиды Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Zr), минорные актиниды (Np, Am, Cm), а также остаточные количества U и Pu. Однако, как и в случае ОЯТ, для ВАО в мире не существует ни одного лицензированного глубинного хранилища по причине необходимости обоснования безопасности таких хранилищ на период до 1 млн лет.

Расчетные данные об уменьшении потенциального долгосрочного воздействия на окружающую среду при захоронении с одной стороны ОЯТ, а с другой стороны РАО, образующихся при реализации замкнутого ЯТЦ с выделением делящихся актинидов (^{239}Pu и ^{235}U) для повторного использования в ядерной энергетике и минорных актинидов (^{237}Np , ^{241}Am , ^{244}Cm) с целью их трансмутации в реакторах на быстрых нейтронах, приведены на рис. 1 [17].

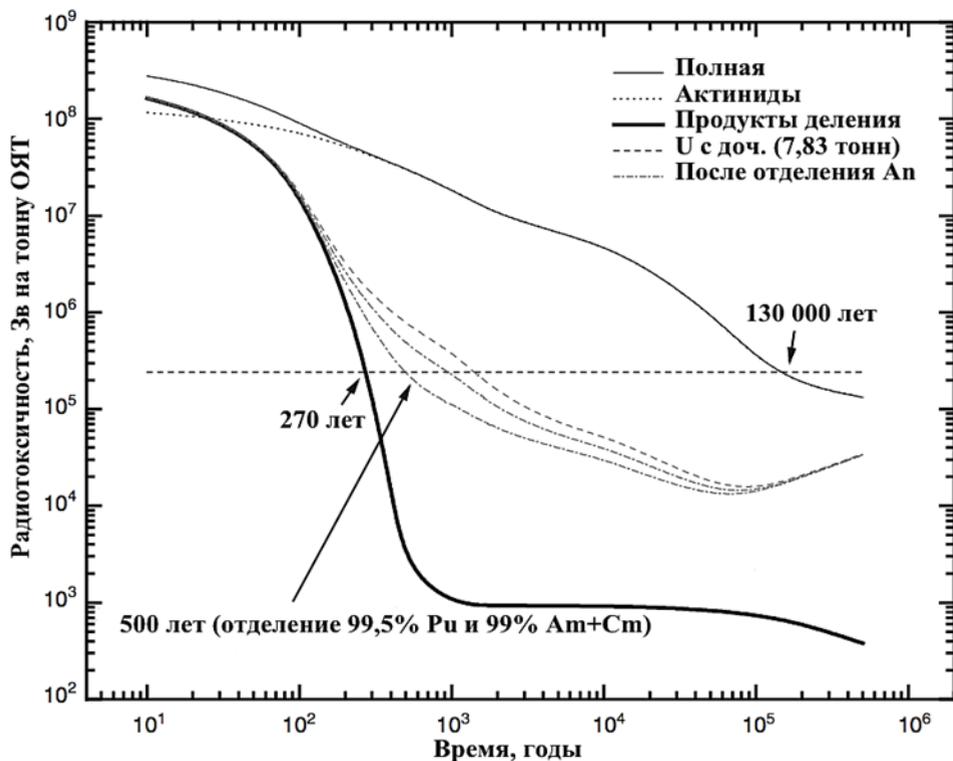


Рис. 1. Изменение радиотоксичности РАО во времени [17]

Так, изменение радиотоксичности РАО во времени после выделения из ОЯТ долгоживущих актинидов уменьшается на много порядков, по сравнению

с радиотоксичностью исходного ОЯТ. Таким образом, замыкание ЯТЦ с мультирециклированием делящихся компонентов, фракционированием радиоактивных отходов для выделения наиболее экологически опасных долгоживущих изотопов (таких как америций) с целью их последующей трансмутации и существенное уменьшения объема РАО – является стратегической научно-технологической задачей, стоящей перед ядерной отраслью страны.

Стратегия замыкания ЯТЦ в России

Стратегической целью ядерной энергетики в России является замыкание ЯТЦ в двухкомпонентной ядерной энергетической системе с реакторами на тепловых и быстрых нейтронах. Основными задачами реализации подобной двухкомпонентной системы являются:

рециклирование делящихся материалов;

минимизация или полный отказ от глубинного захоронения ВАО путем выделения актинид-лантанидной фракции с последующим разделением америция и кюрия для трансмутации америция и хранения кюрия до распада;

фракционирование РАО с целью выделения короткоживущей фракции (Cs, Sr), металлов платиновой группы, технеция и других;

минимизация объемов РАО.

Реализация данной концепции позволит [18–21]:

1) решить отложенные проблемы обращения с ОЯТ и РАО и последовательно сократить объемы накопленного ОЯТ и предотвратить дальнейшее его накопление;

2) вовлечение в ЯТЦ плутония как продукта переработки ОЯТ реакторов на тепловых нейтронах (ВВЭР) для изготовления топлива для реакторов на быстрых нейтронах и полного использования энергетического потенциала природного урана (^{238}U) путем многократного рецикла топливных материалов;

3) фракционирование РАО, извлечение долгоживущих минорных актинидов для дожигания или трансмутации в ядерных реакторах, что, в совокупности с многократным рециклом плутония, позволяет значительно снизить экологическую опасность РАО;

4) технологическая поддержка режима нераспространения делящихся материалов за счет поэтапного исключения обращения обогащенного урана и выделения чистого плутония.

Одним из существенных оснований для перехода к замкнутому ЯТЦ с использованием быстрых реакторов является успешная и не имеющая зарубежных аналогов эксплуатация промышленного реактора на быстрых нейтронах БН-600 на Белоярской АЭС. В 2016 г. введен в эксплуатацию 4-й энергоблок с БН-800, изначально ориентированный на отработку технологий замыкания ЯТЦ [18, 22, 23].

Современная инфраструктура замкнутого топливного цикла в нашей стране приведена на рис. 2.

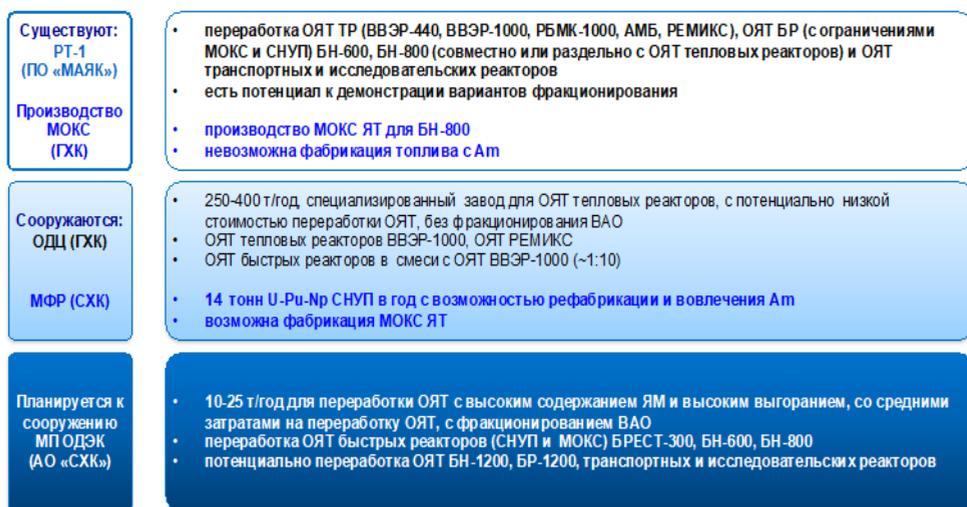


Рис. 2. Современное состояние предприятий замкнутого топливного цикла в РФ (радиохимические технологии)

С 1977 г. эксплуатируется завод РТ-1 ПО «МАЯК». Модернизация РТ-1 позволит эксплуатировать его до 2035 г с возможностью продления срока эксплуатации. Завод РТ-1 может перерабатывать в год до 400 т ОЯТ энергетических реакторов ВВЭР-440, ВВЭР-1000, БН-600, РБМК-1000, транспортных и исследовательских реакторов. За время эксплуатации на заводе РТ-1 переработано более 6000 т ОЯТ.

Переработка ОЯТ реакторов на быстрых нейтронах БН-800 пока не проводилась. В 2012 и 2014 гг. на заводе РТ-1 было успешно переработано 8 тепловыделяющих сборок со смешанным оксидным уран-плутониевым (МОКС) отработавшим топливом БН-600 с выгоранием 73–89 ГВт·сут/т и выдержкой около 20 лет. Существенных потерь плутония в отходы при

переработке МОКС ОЯТ БН-600 не было зафиксировано. Содержание плутония в рафинате составило менее 0,1 мг/л, а в нерастворимых остатках плутоний не обнаружен [20, 24].

На Горно-химическом комбинате введены в эксплуатацию завод по производству смешанного оксидного уран-плутониевого (МОКС) топлива для реактора БН-800 и первая очередь (исследовательские горячие камеры) Опытно-демонстрационного центра (ОДЦ) по переработке ОЯТ ВВЭР-1000. Вторую очередь ОДЦ, с получением исходных оксидов, пригодных для изготовления МОКС и/или топлива на основе неразделенной и небогащенной смеси регенерированных урана и плутония, допированного обогащенным ураном (РЕМИКС), планируется ввести в эксплуатацию в 2021 г. [18, 19].

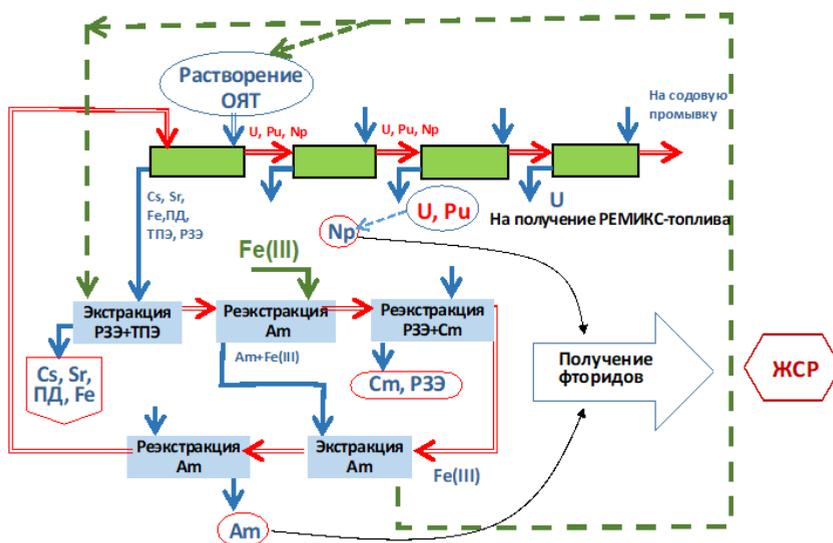


Рис. 3. Принципиальная схема экстракционного «железного» ПУРЕКС-процесса

Развитием технологий ОДЦ может стать экстракционный «железный» ПУРЕКС-процесс (рис. 3):

использование трибутилфосфата как экстрагента; выделение и рециклирование урана, плутония, нептуния;

фабрикация топлива из регенерированных делящихся материалов; выделение актинид-лантанидной фракции из рафината с последующим извлечением америция экстракционным или осадительным методом для его дожигания;

обращение с РАО 1 класса, содержащими цезий, стронций и другие продукты деления;

контролируемое хранение кондиционированных РАО с кюрием и лантанидами до распада с последующей переработкой для извлечения накопленного при распаде плутония.

На Сибирском химическом комбинате создается Опытно-демонстрационный энергетический комплекс (ОДЭК) в составе энергоблока с реактором БРЕСТ-ОД-300 и замыкающего ЯТЦ пристанционного производства. Он включает в себя модули переработки облученного смешанного нитридного уран-плутониевого топлива (СНУП) и фабрикации/рефабрикации для изготовления стартовых ТВЭЛов из привозных материалов и ТВЭЛов из рециклированных материалов.

В настоящее время завершается сооружение модуля фабрикации/рефабрикации ОДЭК для производства СНУП топлива, который планируется ввести в 2022 г. в эксплуатацию. В 2024 г. предполагается начать сооружение модуля переработки ОЯТ.

На модуле фабрикации/рефабрикации ядерного топлива будет реализована технология карботермического синтеза, а на модуле переработки ОЯТ планируется реализовать технологию комбинированной пирохимической и гидрометаллургической переработки СНУП ОЯТ топлива, которая пригодна и для переработки МОКС ОЯТ реакторов на быстрых нейтронах [23]. Для переработки СНУП и МОКС ОЯТ реакторов на быстрых нейтронах с малым временем выдержки разработана комбинированная технология переработки – РН-процесс [25], предполагающая совместное выделение урана и плутония с учетом требований по технологической поддержке режима нераспространения, а также ее чисто гидрометаллургический вариант.

Оба варианта предусматривают также выделение и разделение америция и кюрия, получение в качестве целевого продукта смеси оксидов урана, плутония и нептуния, а также смесей оксидов урана и америция, а также оксидов урана и кюрия. Как вариант, возможно получение смешанных оксидов урана, плутония, нептуния и америция. Пирохимический передел комбинированной технологии находится в состоянии разработки, исследования по гидрометаллургическому переделу комбинированной технологии (рис. 4) – в стадии завершения.

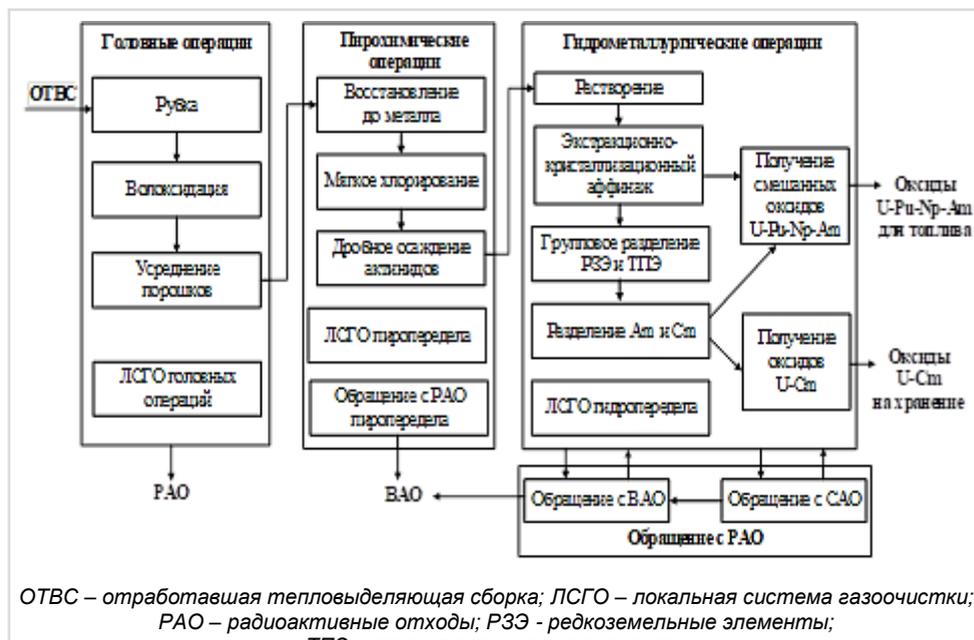


Рис. 4. Принципиальная технологическая схема комбинированной технологии переработки смешанного нитридного уран-плутониевого (СНУП) и смешанного оксидного уран-плутониевого (МОКС) отработавшего ядерного топлива (РН-процесс)

В качестве резервного варианта завершается разработка и чисто гидromеталлургической технологии переработки ОЯТ реакторов на быстрых нейтронах. ОДЭК впервые в мире должен продемонстрировать устойчивую работу полного комплекса объектов, обеспечивающих замыкание ЯТЦ. Пристанционный вариант организации топливного цикла позволяет отработать технологии замкнутого ЯТЦ с малым временем внешнего топливного цикла в минимальные сроки в пределах одной площадки.

С середины 2030-х годов ожидается внедрение конкурентоспособных реакторов на быстрых нейтронах и переход к двухкомпонентной структуре атомной энергетики и замкнутому ЯТЦ.

Замыкание ЯТЦ ставит задачу многократного рециклирования плутония, а следовательно, освоения новых технологий производства смешанного уран-плутониевого топлива.

Широкие возможности заключены в использовании СВЧ излучения для приготовления порошка диоксида урана [26] как основы ядерного топлива из его азотнокислых растворов и из соединений урана (триоксид, пероксид, U_3O_8 и др.), в том числе в присутствии органических восстановителей (карбогидразид, ацетгидроксамовая и аминокусусная кислоты), а также в восстановительной, инертной атмосфере и на воздухе.

Результаты исследования гранулометрического состава, морфологии частиц, физико-химических и технологических свойств полученных образцов, а также определение насыпной плотности, удельной поверхности и массовой доли влаги, показывают, что полученные порошки диоксида урана соответствуют нормативным требованиям.

Спекание таблеток из спрессованного диоксида урана под действием СВЧ излучения мощностью 2,1 кВт при $1650^{\circ}C$ в течение 2 часов приготовлены керамические таблетки с плотностью около $10,40 \text{ г/см}^3$ и открытой пористостью около 0,25 об. %, что соответствует требованиям к топливным таблеткам.

Был разработан метод получения порошков твердых растворов диоксидов урана и церия (имитатор америция), с содержанием последнего 3 и 10 масс. % восстановительной термохимической денитрацией их азотнокислых растворов с использованием СВЧ излучения [27]. Показано, что $Ce(IV)$ образует твердый раствор его диоксида в матрице UO_2 со структурой флюорита.

Полученные порошки состоят из частиц (гранул), образующих фракции, с размерами, не превышающими 400 мкм и долей частиц менее 25 мкм не более 1 масс. %. Их насыпная плотность и насыпной вес с утряской находятся в пределах от 1,8 до $2,5 \text{ г/см}^3$, а полная удельная поверхность не менее $2 \text{ м}^2/\text{г}$. В связи с планируемым вариантом дожига америция в реакторе БРЕСТ-ОД-300 этот способ может быть рекомендован к использованию в качестве основного метода получения смешанных оксидов урана и америция на модуле переработки ОЯТ на опытно-демонстрационном энергокомплексе АО «СХК».

Методы разделения Am(III) и Cm(III)

Важнейшей научно-технологической задачей, требующей решения для реализации замкнутого ЯТЦ и минимизации глубинного захоронения долгоживущих РАО, является групповое выделение изотопов РЗЭ и минорных актинидов (америция и кюрия), а также их разделение между собой.

Сложность решения данной задачи определяется близостью химических свойств этих элементов.

Вне зависимости от стратегии реализации замыкания ЯТЦ – на основе ПУРЕКС-процесса или комбинированной пирохимической и гидрометаллургической технологии, в азотнокислых рафинатах, представляющих собой основную массу ВАО, остаются продукты деления, а также изотопы трансурановых элементов («минорные актиниды, МА» – нептуний, америций и кюрий). Содержание МА по массе не превышает 0,1% от ВАО, но именно они (прежде всего америций) при дальнейшем геологическом захоронении представляют наибольшую опасность, поскольку обладают значительными периодами полураспада и большим тепловыделением.

В связи с этим замкнутый ЯТЦ должен включать в качестве обязательной стадию разделения исключительно близких по химическим свойствам лантанидов и актинидов, а также разделения америция и кюрия. Выделенный из ВАО америций далее можно подвергнуть трансмутации в реакторах на быстрых нейтронах. Кюрий является исходным нуклидом для производства калифорния-252, который используется в нейтронных источниках в ядерной медицине, фундаментальных исследованиях и в атомной промышленности.

На сегодняшний день общепринятой технологией для разделения актинидов и лантанидов является противоточная экстракция в двухфазной системе водный раствор/органический растворитель с использованием селективных органических лигандов, способных образовывать с целевыми катионами стабильные комплексы, которые переносятся в органическую фазу.

Для эффективного выделения минорных актинидов с целью их дожигания и снижения радиоэкологической опасности захораниваемых ВАО были разработаны технологии группового разделения трансурановых и трансплутониевых элементов с использованием экстракционной системы N,N,N',N'-тетра-октилдигликольамид (TODGA) – метанитробензотрифторид (Ф-3) (рис. 5).

В 2017–2018 г. на «ПО «МАЯК» проведены первые «горячие» динамические испытания экстракционной технологии выделения америция и кюрия из реальных ВАО – рафинатов от переработки ОЯТ БН-600 и ОЯТ ВВЭР-440. В результате проведённых испытаний достигнуто извлечение америция из ВАО более чем на 99,9 % [28].

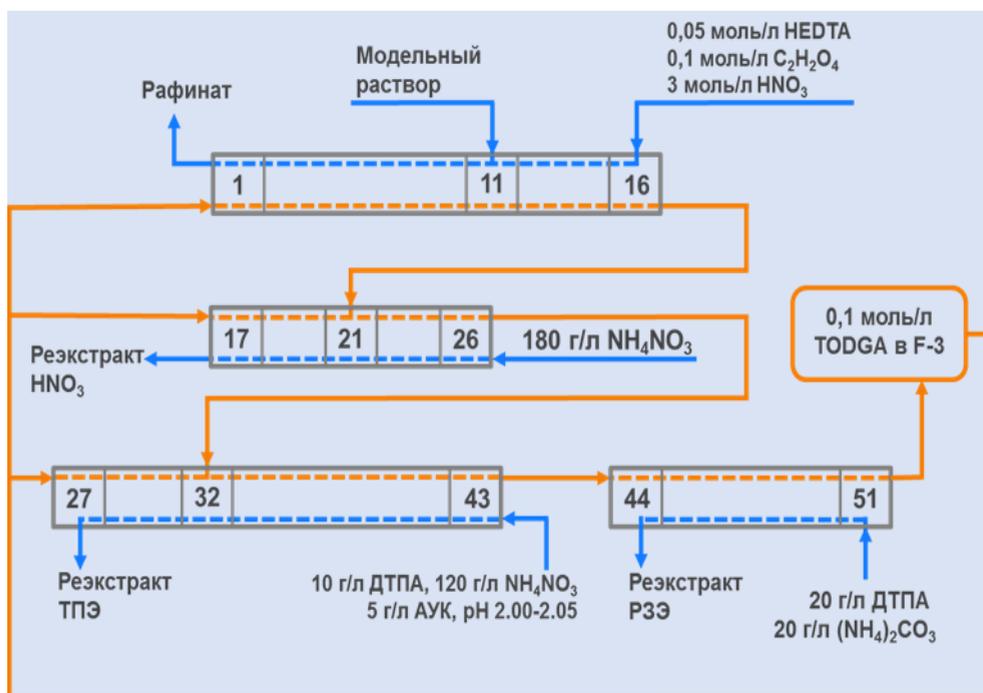


Рис. 5. Принципиальная технологическая схема выделения концентрата ТПЭ в экстракционной системе TODGA – Ф-3

Для разделения америция и кюрия при фракционировании ВАО специалистами АО «ВНИИНМ» и МГУ им. М.В. Ломоносова предложена новая экстракционная система на основе несимметричных дигликольамидов (C8-C12 N,N-диоктил-N',N'-дидодецилдигликольамид и C10-C12 N,N-дидецил-N',N'-дидодецилдигликольамид) с непожароопасными разбавителями, не содержащими фтора или хлора.

В ходе исследования экстракционных свойств полученных лигандов было показано, что стехиометрическое количество азотной кислоты экстрагируется во всех системах при равновесном содержании азотной кислоты 3 моль/л. Тип растворителя (тридекан или «Изопар-М») не оказывает влияния на экстракционные характеристики. Для всех экстракционных систем продемонстрирована фазовая устойчивость до 50 г/л по неодиму в водной фазе. Образование третьих фаз наблюдается при контакте органических растворов с растворами иммитантами ВАО, содержащих палладий(II) и цирконий(VI) свыше 0,6 г/л и 0,7 г/л (для органических фаз на основе C8-C12).

Образование третьих фаз при больших содержаниях указанных элементов может подавляться за счёт введения водорастворимых комплексонов или октанола-1 в органическую фазу. С ростом температуры наблюдается падение коэффициентов распределения в 10 раз при переходе от 10 до 50 °С. Промывка от продуктов деления палладия (II) и циркония (IV) может быть осуществлена за счёт введения комплекса НЕДТА и щавелевой кислоты, соответственно.

Количественная экстракция америция и кюрия может быть произведена раствором ДТПА (10 г/л) при pH 2, в присутствии 0,5 моль/л нитрата натрия.

АО «ВНИИНМ» совместно с ИФХЭ РАН ведут совместные разработки сорбционно-хроматографической технологии разделения Am и Cm. В результате проведенной работы была разработана математическая модель процесса разделения, а также предложены варианты обращения с отработанным сорбентом.

В 2015 г. на опытно-промышленной установке «ПО «МАЯК» при участии ИФХЭ РАН были проведены пилотные испытания сорбционно-хроматографической технологии разделения америция и кюрия с использованием сульфокатионита. В качестве исходного раствора использовался концентрат редкоземельных и трансплутониевых элементов, полученный из рафината экстракционной переработки ОЯТ ВВЭР-440. Во время испытаний давление в системе не превышало 3 атм. В результате аффинажного процесса было выделено около 9 г чистого Cm и примерно 65 г чистого Am (56% от исходного) с содержанием кюрия менее 0,8 % по массе и $^{154,155}\text{Eu}$ - менее 0,1% по активности [29].

На базе АО «ВНИИНМ» с использованием концентрата РЗЭ-ТПЭ от переработки ОЯТ ВВЭР-440 проведена проверка разделения Am и Cm методом высокоэффективной жидкостной хроматографии. В результате было получено 1,39 г Am с чистотой более 99,9% (96% от исходного количества). Объединенная фракция Cm содержала 36,4 мг Am (около 2,6 % от исходного количества). Количество Am в фракциях Am-Eu и Am-Cm не превышало 4 % от его исходного количества.

Использование монодисперсного сульфокатионита российского производства ООО «Техносорбент» СПС SAC (8%)-50 позволило получить высокий выход и чистоту Am фракции, при этом зоны смешения Am-Cm и Am -Eu оказались незначительными по объему.

В рамках сотрудничества между ГК «Росатом», РАН и МГУ им. М.В. Ломоносова исследованы различные высокоселективные экстракционные системы для разделения как РЗЭ и минорактинидов, так и америция и кюрия.

С использованием результатов суперкомпьютерного моделирования и проведенных затем исследований были выявлены экстрагенты (диамиды фенантралиндикарбоновой кислоты), демонстрирующиеся на рис. 6, которые, по данным теоретического прогноза, должны обладать высокой селективностью в процессах экстракционного разделения трехвалентных f-элементов.

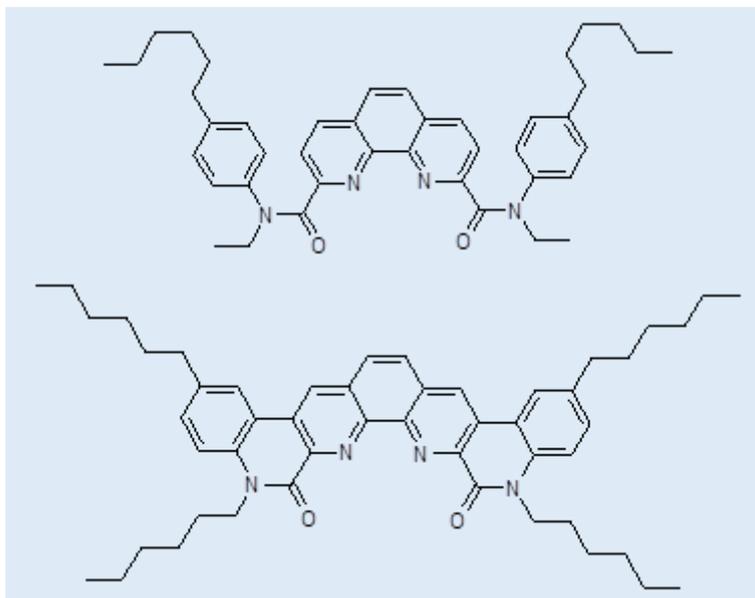


Рис. 6. Базовые структуры диамидов фенантралиндикарбоновых кислот, исследованные для разделения РЗЭ и минорных актинидов, а также америция и кюрия

Был разработан метод и осуществлен синтез большой серии соединений этих типов. Получены значения факторов селективности при разделении стандартной пары америций/европий $SF_{Am/Eu} \geq 150$ и при разделении пары америций/кюрий $SF_{Am/Cm} \geq 7$, что близко к рекордным значениям, достигнутым на сегодняшний день в мире.

Был также разработан и успешно испытан новый подход к созданию экстракционных систем для разделения актинидов и лантанидов, основанный на применении гидрофильного и гидрофобного лигандов в водной и

органической фазе соответственно (стратегия гидрофильно-гидрофобной пары), позволяющий существенно улучшить селективность разделения целевых металлов.

Важно, что разработанные лиганды обладают высокой радиационной и гидролитической устойчивостью. Они не теряют своих экстракционных свойств при γ -облучении до доз 500 кГр и при альфа-облучении до доз порядка 200–300 кГр. При этом процесс экстракции является быстрым и полностью обратимым. Кроме того, разработанная экстракционная система является пожаровзрывобезопасной.

При испытаниях на экстракторах центробежного типа (АО «Радиевый институт») из азотнокислых растворов, содержащих смесь америция и кюрия (суммарная концентрация 0,11 г/л), удалось выделить в отдельную фракцию не менее 99% америция с чистотой не менее 99,9% (по кюрию). Более того, исходный раствор представлял собой раствор после переработки реального ОЯТ ВВЭР-1000 и содержал такие мешающие компоненты, как нитрат аммония (570 г/л), ДТПА (10 г/л), аминокусусную кислоту (5 г/л) и примесь плутония. Это не помешало разделению целевых компонентов.

Новые безопасные матрицы для иммобилизации ВАО

Ввиду высокой радиационной опасности и химической токсичности ВАО необходимо для последующего хранения переводить их в более безопасную форму. Единственной доведенной к настоящему времени до стадии промышленного применения является технология остекловывания ВАО. Она включает в себя процессы сушки, кальцинации, сплавления со стеклообразующими добавками в специальных печах (плавителях) и розлива в канистры для долговременного хранения. Технология остекловывания применяется для отверждения нефракционированных ВАО во Франции, России, Великобритании, США и в др. В большинстве стран применяют стекло на боросиликатной основе, а в России – на алюмофосфатной основе [30].

Выбор состава матричного материала для иммобилизации ВАО зависит, прежде всего, от химического состава самих ВАО, а также от типа применяемого плавителя и другого оборудования, геологических условий дальнейшего хранения и т.п. Боросиликатные стекла обладают комплексом физико-химических характеристик, позволяющих использовать их для иммобилизации большинства компонентов ВАО. Они имеют высокую

химическую и радиационную устойчивость, хорошие механическую прочность, теплопроводность, вязкость и электрофизические характеристики. В то же время они характеризуются низкой растворимостью по отношению к актинидам, РЗЭ и ряда переходных элементов.

Алюмофосфатные стекла, получающиеся при меньших температурах (800–1000 °С), способны растворять большие количества этих компонентов ВАО, чем боросиликатные стекла, которые получают при температуре 1050–1200 °С. Однако алюмофосфатные стекла характеризуются более резким изменением вязкости с температурой и обладают меньшей кристаллизационной устойчивостью, а области составов стекла с высокой химической устойчивостью у них меньше.

Известна высокая физико-химическая стабильность в геологической среде природных фосфатных минералов (монацит, апатит), содержащих природный уран и торий в концентрациях, достигающих десятков массовых процентов. Это указывает на перспективность использования синтетических аналогов минералов в качестве матриц для иммобилизации РАО.

Прорывные результаты в последние годы [31–33] были получены при исследовании возможности использования кристаллического двойного ортофосфата магния и калия (МКФ) в качестве синтетических матриц для долговременного и экологически безопасного хранения (или захоронения) жидких РАО, в том числе актинид-содержащих отходов. Синтез МКФ матрица происходит при комнатной температуре в водном растворе согласно реакции:



Нетермический процесс (комнатная температура, атмосферное давление) получения МКФ матриц подобен цементированию и характеризуется незначительными энергозатратами, простотой реализации и мобильностью процесса отверждения, а простота аппаратного оформления метода приводит к минимизации «вторичных» РАО.

Использование МКФ обеспечивает ряд ощутимых преимуществ:
возможность отверждения отходов в широком диапазоне их рН;
высокая степень наполнения полученных матриц компонентами РАО;
их высокая химическая и радиационная устойчивость;
устойчивость к воздействию низких температур.

Заключение

Ядерная энергетика является единственным высококонцентрированным зеленым источником электроэнергии, доля которой в мировой выработке, по всей видимости, будет увеличиваться. Согласно сценарию декарбонизации (производство не более 50 г CO₂ на кВт выработанной электроэнергии), доля ядерной энергетике должна увеличиться на 55% к 2040 году до 4320 ТВт·ч вырабатываемой электроэнергии.

Однако реализация ЯТЦ нового поколения должна включать решение проблем накапливающихся РАО, их минимизацию при максимальном использовании потенциала делящихся материалов путем их мультирециклирования.

Реализация данной стратегии основывается на двухкомпонентной ядерной энергетике – тепловые реакторы с низким коэффициентом воспроизводства производят «дешевое» электричество, а реакторы на быстрых нейтронах с коэффициентом воспроизводства больше 1 обеспечивают топливную базу всей системы и утилизируют ОЯТ тепловых реакторов.

Литература

1. Bequerel H. *C.R.Acad.Fr.*, 1896, Vol. 122, p. 420.
2. Curie P., Curie M. *C.R.Acad.Fr.*, 1898, Vol. 127, p. 175.
3. Curie P., Curie M, Bemoind G. *C.R. Acad.Fr.*, 1898, Vol. 127, p. 1215.
4. Debieme A. *C.R.Acad.Fr.* 1899, Vol. 129, p. 593.
5. Rutherford E. *Philos.Mag.*, 1900, Vol. 49, p. 1.
6. Dorn E. *Abhandl.Naturforsch Ges. Halle.*, 1900, Vol. 22.
7. Вернадский В.И. Очерки и речи. – Научхимтехиздат, 1922, т.1, с. 37.
8. Зайцев Л.Л., Фигуровский Н.А. Исследования явлений радиоактивности в дореволюционной России. М: АН СССР, 1961, с. 223.
9. Крот Н.Н., Гельман А.Д. *Доклады АН СССР*, 1967. том 177, № 1, с. 124–126.
10. Myasoedov B.F. *J.All.Comp.*, 1994, Vol. 213–214, p. 290–299.
11. Mikheev N.B., Myasoedov B.F. In: Handbook of the physics and chemistry of the actinides, Vol. 3, Elsevier Science Publ., 1985, p. 347.
12. Колтунов В.С. Кинетика реакций актиноидов. М.: Атомиздат, 1974, с. 312
13. Principles and practices of solvent extraction. Second Edition, Revised and Expanded. Ed. by J. Rydberg, M. Cox, C. Musikas, G.R. Choppin. Marcel Dekker, 2004, p. 760.

14. Виноградов А.П. Физико-химические методы контроля производства урана. В кн.: Доклады Советской делегации на международной конференции по мирному использованию атомной энергии, Женева, 1955.
15. IAEA Power Reactor Information System, <https://pris.iaea.org/pris/>.
16. Ceyhan M., Lee J.S. Proceedings of the international conference on management of spent fuel from power reactors, IAEA, Vienna, 2006, p. 1.
17. IAEA: Implications of Partitioning and Transmutation in Radio- active Waste Management (IAEA, Vienna, Austria, 2004); 140 pp.
18. Khapersaya A., Kruykov O., Ivanov K. SNF management in Russia: Status and future development. International Conference on the Management of Spent Fuel from Nuclear Power Reactors: Learning from the Past, Enabling the Future, IAEA-CN-272/53, 2020, Paper ID №25, p. 93–98.
19. Fedorov Y. Multiple recycle of REMIX fuel based on reprocessed uranium and plutonium mixture in thermal reactors. Proc. Int. conf. Global 2013, Salt-Lake-City, USA, № 8111.
20. Sheremetyev A., Koulupev D. Experience and prospects of spent nuclear fuel reprocessing at Mayak. Management of spent fuel. From nuclear power reactors. Learning from the past, enabling the future. Proceedings of an International Conference IAEA-CN-272/53, 2020, Paper ID №53, p. 161–166.
21. Пономарев-Степной Н.Н. *Атомная энергия*, 2016, том 120, Вып. 184 (4), с. 183–191.
22. Адамов Е.О. *Атомная энергия*, 2012, том 112, Вып. 6, с. 319–331.
23. Белая книга ядерной энергетики. Замкнутый ЯТЦ с быстрыми реакторами. под общ. ред. проф. Е.О. Адамова. – М.: Изд-во АО «НИКИЭТ», 2020. С. 498.
24. Kolupaev D., Logunov M., Shadrin A. *Procedia Chemistry*, 2016, p.198–202.
25. Shadrin A.Y., Dvoeglazov K.N., Ustinov O.A. *Radiochemistry*, 2016, Vol. 58, 3, p. 271–279.
26. Kulyako Y.M., Trofimov T.I., Pilyushenko K.S., Malikov D.A., Perevalov S.A., Vinokurov S.E., Savel'ev B.V., Myasoedov B.F. *Radiochemistry*, 2019. Vol. 61. 1.
27. Kulyako Y.M., Vinokurov S.E., Trofimov T.I., Pilyushenko K.S., Malikov D.A., Perevalov S.A., Savel'ev B.V., Myasoedov B.F., Dvoeglazov K.N., Shadrin A.Y. *Radiochemistry*, 2019, Vol. 61, 6, p. 661–664.
28. Shadrin A.Y., Dvoeglazov K.N., Ustinov O.A. *Radiochemistry*, 2016, Vol. 58, 3, p. 271–279.
29. Milutin V., Kharitonov O., Firsova L., Kozlitin E., Yakovlev N., Fadeev S., Logunov M., Voroshilov Yu., Vidanov V., Shadrin A. Hot test of technique separation of americium and curium. International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles, 26–29 June 2017, Yekaterinburg, Russian Federation, paper CN, p. 245–237.
30. Stefanovsky S.V., Yudintsev S.V., Giere R. and Lumpkin G.R. Nuclear Waste Forms. Energy, Waste and the Environment: A Geological Perspective, Geological Society, Special Publication, London, 2004, vol. 236, p. 37.

31. Vinokurov S.E., Kulikova S.A., Myasoedov B.F. *Nuclear Engineering and Technology*, 2019, Vol. 51, 3, pp. 755–760.

32. Kulikova S.A., Belova K.Y., Tyupina E.A., Vinokurov S.E. *Energies*, 2020, Vol. 13, p. 1963.

33. Лизин А.А., Яндаев Д.М., Шадрин А.Ю. *Радиохимия*, 2020, т. 62, 1, с. 79–86.

Е.П. Велихов¹, В.И. Ильгисонис²

ПЕРСПЕКТИВЫ ТЕРМОЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Почти 70 лет системных исследований ведущих мировых стран в области управляемого термоядерного синтеза (УТС) с неизбежностью требуют подтверждения актуальности целей и доказательств продуктивности таких исследований. Мнения о том, что дорогостоящие исследования и разработки в области УТС являются бесперспективными, выбранные подходы неверными, а поставленные задачи нерешаемыми и необоснованными регулярно появляются как в средствах массовой информации, так и в прогнозных оценках государственных и околосударственных структур.

Эти мнения отнюдь не всегда исходят от дилетантов, их можно услышать и из уст профессионалов в области ядерной энергетики и физики плазмы (см., например, [1]). При этом недооценивается важнейший, как сегодня представляется, фактор технологического развития, необходимый для реализации термоядерных технологий, и существующие уже сейчас возможности их практического использования, а физические и технологические трудности, стоящие на пути реализации УТС, гиперболизируются.

Этим и некоторым другим вопросам термоядерных исследований и посвящен настоящий раздел книги. Предметом обсуждения будут являться исследования с использованием установок типа токамак – замкнутых систем магнитного удержания высокотемпературной плазмы, являющихся с 1970-х годов наиболее продвинутыми и эффективными. Наличие ряда предшествующих обзоров (см., напр., [2–4]), описывающих состояние и перспективы УТС, оправдывает краткость изложения позиции авторов настоящего раздела.

Мы были первыми

В условиях ограниченности ресурсов, выделяемых на научно-технологическое развитие, для крупных корпораций или целых стран неизбежна постановка вопроса о выборе приоритетов, решаемого зачастую

¹ Почётный президент НИЦ «Курчатовский институт», академик РАН.

² Директор направления научно-технических исследований и разработок Госкорпорации «Росатом», доктор физико-математических наук.

волевым образом или посредством лоббирования. К числу более или менее объективных критериев выбора таких приоритетов можно отнести следующие:

наличие компетенций и серьёзных заделов в разработке направления развития (при их отсутствии трудно претендовать на достижение технологического лидерства);

научно- и трудоёмкость направления (в отсутствие которых преимущество – на стороне малого и среднего бизнесов, как более гибких и оперативных);

долговременность и стратегический характер реализации направления (без чего масштабные вложения в данное направление окажутся неоправданными);

быстрое развитие смежных/побочных направлений (что позволяет оправдывать, хотя бы частично, вложения в ходе решения основной задачи, демонстрируя их продуктивность).

Более подробно позиция авторов о роли и месте прикладной науки изложена в [5]. Здесь же отметим, что термоядерные исследования в нашей стране с использованием токамаков вполне соответствуют вышеуказанным критериям.

Не углубляясь в историю отечественных термоядерных исследований, неоднократно описанную с разной степенью детализации (см., например, [6, 7]), укажем на ключевые достижения мирового уровня, позволяющие обоснованно утверждать о наличии необходимых компетенций российских учёных в этой области:

1955 г. – сооружён тор с магнитным полем (ТМП – прообраз токамака);

1958 г. – запущена установка Т-1 – первый токамак из нержавеющей стали;

1959 г. – создан токамак Т-2 (содержит прогреваемую камеру и все базовые системы современных токамаков);

1962 г. – на токамаке ТМ-2 применены обмотки вертикального поля;

1968 г. – на конференции МАГАТЭ (г. Новосибирск) доложены результаты рекордных экспериментов на токамаке Т-3А (получена температура электронов $T_e \approx 1$ кэВ при энергетическом времени жизни $\tau_E \approx 20$ мс);

1973 г. – на токамаке Т-9 продемонстрированы преимущества вытянутого сечения плазмы, ранее предсказанные теоретически;

1975 г. – на токамаке T-10 применение нового устройства электронного циклотронного нагрева – гиротрона – позволило впервые достичь термоядерной температуры $T_e \approx 9$ кэВ);

1976 г. – запущен токамак T-12, на котором впервые получена диверторная¹ магнитная конфигурация и продемонстрирована стабилизация вертикальной неустойчивости плазмы;

1979 г. – запущен первый в мире токамак со сверхпроводящими обмотками магнитного поля T-7 и применён метод неиндукционного поддержания тока;

1988 г. – выполнен физический пуск токамака T-15 (с использованием передового сверхпроводника NbSn и мультимегаваттного дополнительного нагрева плазмы: 10 МВт гиротронами и 9 МВт инъекцией быстрых атомов).

К этим экспериментально проверенным достижениям, впоследствии взятым на вооружение во всём мире, следует добавить широко признанные теоретические разработки, легшие в основу современной теоретической физики высокотемпературной плазмы.

За что боремся

Главным целевым параметром, достижение требуемого значения которого обеспечит термоядерное «горение» с положительным энергобалансом дейтериево-тритиевой смеси², служит так называемое тройное произведение

$$nT\tau_E \geq 3,5 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3} \text{ К с}, \quad (1)$$

где n – концентрация, T – температура ионов плазмы.

При этом существенны и самостоятельные значения величин, входящих в тройное произведение (1), а именно, следует обеспечить

$$n \geq 10^{20} \text{ м}^{-3}, T \geq 10^8 \text{ К}, \tau_E \geq 1 \text{ с}. \quad (2)$$

¹ Дивертор – конструктивный элемент современного токамака или иного термоядерного устройства, обеспечивающий эффективный приём основных потоков частиц и энергии с периферии высокотемпературной плазмы.

² Сегодня УТС ориентирован преимущественно на реакцию между дейтерием и тритием. Другие возможности, в том числе так называемые безнейтронные реакции, могут быть реализованы при существенно более высоких значениях параметров (в первую очередь температуры) плазмы, пока недостижимых.

На практике важно добиться квазистационарной работы реактора. Поэтому кроме параметров (1), (2) имеет значение ещё и длительность разряда.

Прогресс, достигнутый в результате многолетних исследований на токамаках, не следует недооценивать. Достижение всех необходимых для реализации УТС значений параметров (2) сегодня продемонстрировано экспериментально, но, к сожалению, в разных экспериментах (см. табл. 1).

Таблица 1

Экспериментально полученные значения параметров плазмы в токамаках, отвечающие требованиям УТС

Токамак	Страна	Год	Достижение
TFTR	США	1986	тройное произведение = $1,74 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3} \text{ К с}$ температура = $2 \cdot 10^8 \text{ К}$
Alcator C-Mod	США	2016	$n = 2 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$, давление плазмы = 2,05 атм, тройное произведение = $0,8 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3} \text{ К с}$
JT-60U	Япония	2013	температура = $5,2 \cdot 10^8 \text{ К}$ тройное произведение = $1,77 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3} \text{ К с}$ энергетическое время жизни = 1,1 с
TRIAM-1M	Япония	2005	стационарная работа 5 часов 16 мин.
EAST	КНР	2017	длительность 17 мин., в H-режиме ¹ – 101,2 с
JET	Великобритания	1996, 1998	термоядерный выход мощностью 16,1 МВт, длительность 20 с
KSTAR	Республика Корея	2020	энергетическое время жизни = 1 с температура = $5,2 \cdot 10^8 \text{ К}$

Полученные значения тройного произведения более чем в 1000 раз превышают данные середины семидесятых годов прошлого века, когда стартовали первые крупные токамаки с дополнительным нагревом плазмы².

На токамаках TFTR и JET в работе с дейтериво-третиевой плазмой достоверно зарегистрировано протекание термоядерных реакций синтеза, причём на токамаке JET – с рекордным термоядерным тепловыделением [8], мощность которого оказалась сравнимой с мощностью, введённой в плазму (достигнутый коэффициент выхода $Q = 0,67$). При $Q \geq 1$ можно говорить о

¹ H-мода (от английского High-mode) – режим улучшенного удержания плазмы в токамаке (обычно – в токамаке с дивертором), характеризуемый повышенной (при том же энерговкладе) температурой плазмы в центре токамака и довольно резким скачком температуры на его периферии («транспортный барьер»).

² «Дополнительным» называется нагрев плазмы за счёт внешних источников, вводимых в плазму излучения, или быстрых частиц – в отличие от омического (индукционного) нагрева плазмы токамака протекающим по плазме током.

положительном энергovyxоде – так называемая «точка безубыточности», «breakeven». Доказана возможность длительной работы токамака, правда, лишь в относительно «спокойных» режимах при значениях параметров плазмы, отличных от требуемых (2).

Зачем нужен ИТЭР

Общеизвестно, что повышение времени жизни плазмы можно обеспечить путём увеличения размеров токамака и величины магнитного поля. И то, и другое сопряжено с существенным удорожанием установки. Вот почему следующий шаг по проторенной «токамачьей» дороге к овладению УТС было решено делать общими усилиями в рамках проекта международного термоядерного экспериментального реактора ИТЭР, участниками которого в итоге стали страны Евросоюза, Индия, КНР, Республика Корея, Российская Федерация, США и Япония (всего 35 стран).

Именно на реализацию проекта ИТЭР в последнее десятилетие были направлены основные усилия мирового термоядерного сообщества. При этом большинство участников вполне плодотворно использовали в своих национальных программах знания и технические решения, добытые общими усилиями при проектировании ИТЭРа. В соответствии с табл. 1 лидерами сегодня следует признать сверхпроводящие токамаки: китайский EAST и корейский KSTAR; Япония совместно с ЕС завершает строительство нового сверхпроводящего токамака JT-60SA, намереваясь ввести его в строй уже к концу 2021 г., – на 4 года раньше планируемого срока получения первой плазмы в ИТЭРе.

И наоборот, данные, получаемые в ходе исследований, выполняемых национальными командами, анализируются и учитываются в проекте ИТЭР. Отметим, что планируемые режимы работы ИТЭРа основаны на довольно консервативных представлениях и достаточно обоснованы предшествующими экспериментами [9]. Вместе с тем ИТЭР – это качественный скачок в токамакостроении. Для примера, объём плазмы ИТЭРа равен 840 м^3 , что более чем в 10 раз превосходит объём плазмы самого крупного из действующих токамаков – токамака JET.

Строительство и запуск ИТЭРа призваны продемонстрировать работоспособность идеологии, позволяющей создать на базе токамака термоядерный энергетический реактор. Следует отметить, что сам ИТЭР

таковым ещё не будет. Его основная задача – подтвердить экспериментально возможность квазистационарного (длительностью до ~ 50 мин.) режима термоядерного горения с выделением термоядерной энергии, в 5 раз превышающей энергию, вкладываемую в плазму ($Q = 5$). При этом предполагается неиндукционное поддержание тока в течение разряда. С использованием дополнительного нагрева мощностью 50 МВт предполагается получить 500 МВт термоядерной мощности ($Q = 10$) при индуктивном поддержании тока в течение 400 с. Основной задачей экспериментов на ИТЭРе будут отработка и испытание важнейших технологий и компонент реактора.

Необходимо отметить, что, несмотря на «консервативный» характер планируемых режимов ИТЭРа, целый ряд технологических решений будет опробован впервые; это относится, например, к испытаниям модулей blankets для наработки трития. Принципиально важной будет проверка концепции использования вольфрама в качестве материала для диверторных пластин – как самого тугоплавкого металла – в условиях ожидаемых на ИТЭРе огромных потоков энергии.

Напомним, что наилучшие режимы удержания плазмы получены сегодня при использовании покрытий с низким зарядовым числом атомов в составе покрытия – углерода и бериллия. В ИТЭРе этими материалами будет покрыта первая (обращённая к плазме) стенка вакуумной камеры. Вопрос о том, будут ли и в каком количестве ионы вольфрама поступать в основную плазму, снижая её температуру за счёт излучения, может быть окончательно решён только в ходе экспериментов на ИТЭРе.

Начиная с 2016 г. проект ИТЭР развивается вполне успешно, выполнено более 70% объёма работ, необходимых для получения первой плазмы. В августе 2020 г. Международная организация ИТЭР официально объявила о начале сборки на площадке в Сен-Поль-Ле-Дюранс (Saint-Paul-lez-Durance), Франция, собственно токамака (рис. 1).

Это событие стало предметом пристального внимания со стороны масс-медиа и заслужило ряд приветственных обращений высшего политического руководства стран-участников проекта. В случае соблюдения действующего ныне графика строительства, выполнения всеми сторонами своих обязательств и преодоления последствий пандемии 2020–2021 гг., первая плазма в токамаке ИТЭР будет получена в 2025–2026 г., а на реальный режим работы на дейтериево-тритиевой смеси токамак выйдет не ранее 2035 г.

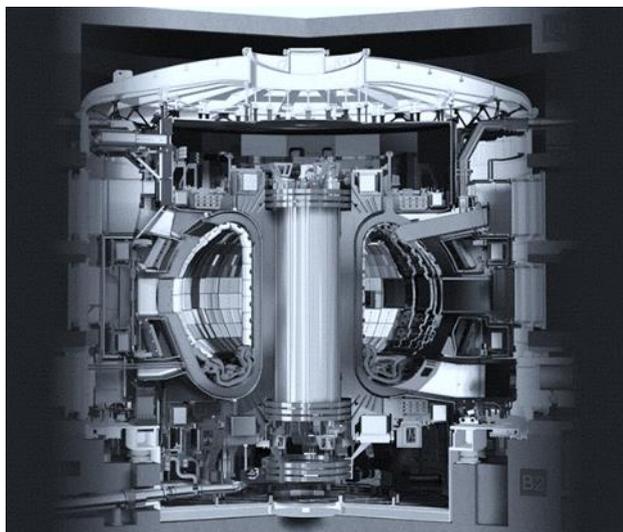


Рис. 1. Схема в разрезе токамака ИТЭР [<https://www.iter.org/mach>]

Токамаки сегодня – что не так?

С учётом накопленного за прошедшие десятилетия опыта проведения термоядерных исследований, естественно задаться вопросом, можно ли указать основные научно-технические и/или инженерные проблемы, препятствующие скорейшему достижению необходимых для УТС значений параметров плазмы (2) и созданию термоядерного реактора-токамака? По мнению авторов, основные проблемы вполне понятны и могут быть поименованы.

Во-первых, это колоссальная технологическая сложность самого устройства, которая особенно ясно проявилась в проекте ИТЭР. 50 лет назад токамаки победили в соревновании различных систем для удержания плазмы, во многом благодаря своей идейной простоте. Протекающий по плазме токамака электрический ток в тороидальном магнитном поле обеспечивает как формирование итоговой магнитной конфигурации, являющейся идеальной ловушкой для удержания частиц плазмы, так и нагрев этой плазмы. Однако для устойчивого удержания плазмы с термоядерными параметрами требуется множество инженерных систем, создание которых находится на пределе имеющихся технологических возможностей. Так, например, стационарность требует сверхпроводимости магнитных обмоток; при этом на стенку камеры и

в дивертор идут колоссальные потоки тепла. Понятно, насколько серьёзными должны быть инженерные решения, обеспечивающие такое соседство.

Другой пример связан с необходимостью создания мощных источников высокоэнергетических нейтральных атомов – речь идет о нескольких мегаваттах мощности при энергии в сотни и даже тысячи килоэлектронвольт (в ИТЭРе 2 таких источника суммарной мощностью 33 МВт должны выдавать потоки МэВных¹ частиц в течение часа). Ранее таких источников просто не существовало!).

Во-вторых, это достаточно очевидная проблема длительного поддержания тока. Униполярный электрический ток, наводимый в тороидальной плазме при помощи индуктора, не может существовать вечно (с электротехнической точки зрения токамак представляет собой трансформатор с одновитковой вторичной обмоткой – плазмой). Сегодня предложено и экспериментально проверено несколько способов неиндукционного поддержания тока, среди которых уже упомянутая инжекция пучков быстрых нейтральных атомов. Можно использовать и ввод обладающих компонентой импульса в тороидальном направлении электромагнитных волн различного диапазона: электронного, циклотронного, нижнегибридного, а также свистового (волны-геликоны).

Весьма интересен и крайне важен так называемый бутстрэп-эффект (bootstrap), заключающийся в формировании анизотропной функции распределения заряженных частиц неоднородной плазмы в магнитной конфигурации токамака (эффект связан с тороидальной геометрией токамака и в цилиндре отсутствует). Доказанная на экспериментах возможность обеспечить более 80% тока за счёт бутстрэп-эффекта [10] при наличии эффективных средств нагрева плазмы фактически выводит задачу поддержания тока из числа критических проблем УТС. Точно так же большинство физических вопросов, казавшихся непреодолимыми на начальном этапе работ по УТС, таких как управление равновесием, многочисленные неустойчивости, аномальные процессы переноса, сегодня решены на практическом уровне.

В конечном счёте наиболее принципиальной сегодня можно считать задачу устранения негативного воздействия стенки, ограничивающей разряд,

¹ 1 мегаэлектронвольт [МэВ] $\approx 1,60 \times 10^{-9}$ эрг $\approx 1,60 \times 10^{-16}$ Дж, что по формуле Эйнштейна составляет примерно одну промилле атомной единицы массы.

и других взаимодействующих с плазмой элементов. Проблема взаимодействия плазма-стенка для УТС двоякая.

С одной стороны, это вопрос стойкости материала, который охрупчивается, бомбардируемый выходящими из плазмы потоками частиц и излучения, накапливает структурные дефекты (особенно под воздействием нейтронов), растрескивается, иногда плавится и/или расплывается. Экстремально высокий уровень тепловой нагрузки ($\sim 2-3$ МВт/м² на первую стенку и внутрикамерные элементы, ~ 10 МВт/м² на пластины дивертора или лимитера) требует, по сути, разработки и синтеза принципиально новых термостойких конструкционных и функциональных материалов.

С другой стороны, существует обратное влияние на плазму. Выбиваемые из стенки примесные атомы и молекулы поступают и могут накапливаться в плазме, приводя к дополнительным потерям на излучение, диссипации тока и даже деградации разряда. Накопление примесей вблизи стенки (продуктов её эрозии) увязывают с сокращением длительности разряда. Кроме того, стенка может довольно эффективно абсорбировать изотопы водорода, служащие термоядерным горючим.

На рис. 2, заимствованным из работы [11], экспериментальные режимы имеющихся токамаков отмечены точками на плоскости «длительность разряда – плотность потока энергии на стенку». Отчётливо видно, что для сверхпроводящих систем повышение длительности разряда пока удается совмещать только со снижением нагрузки на стенку. Имеются представления о том, что нагрузка ограничена электрическими пробоями плазменного слоя. Поэтому причиной снижения продолжительности разряда Δt с ростом нагрузки может быть постепенное накопление продуктов эрозии в зонах контакта плазмы с первой стенкой токамака, способствующее таким пробоям.

Возможности довольно кардинального решения задачи «плазма-стенка» просматриваются уже сегодня. Одна из них заключается в использовании жидкого лития как материала с низким зарядовым числом в промежуточном слое между плазмой и стенкой или пластинами дивертора. При этом возможные функции такого литиевого слоя могут несколько различаться.

Струя циркулирующего лития может стать приёмником потока тепла, приходящего на диверторные пластины, а также поглотителем продуктов эрозии, гелия и «избыточного топлива». Литий должен собираться специальными литиевсборниками и очищаться от абсорбированных продуктов

стенкой. Продуктивность этой концепции [12] и иных возможностей использования лития требует детальной экспериментальной проверки.

Дальнейшая экстраполяция этой концепции заключается в полном отказе от стенки, ограждающей плазменный объем. Речь идет о проработке возможности сооружения магнитного термоядерного реактора в космосе на околоземной орбите. Такой подход имеет ряд потенциальных преимуществ (включая гарантированную реализацию нулевого рециклинга), хотя и представляется труднореализуемым. При этом магнитная конфигурация термоядерного реактора космического базирования может и должна быть предметом оптимизации, в том числе по параметрам (таким как вес, присутствие дополнительных систем, простота монтажа и пр.), малосущественным для стандартного токамака, но крайне важным для объекта в космосе. Поэтому реализацию этого направления следовало бы начать с глубокой концептуальной проработки и маломасштабных космических экспериментов.

Следует отметить, что идеи космического размещения энергетического реактора обсуждались ещё в 1970-х годах. Целесообразность их рассмотрения в настоящий момент оправдывается качественно иным достигнутым уровнем развития космонавтики, с одной стороны, и прогрессом в термоядерных технологиях и в понимании физики термоядерной плазмы, с другой стороны.

Это переводит такие идеи из области гипотез в сферу проектов, доступных для воплощения в жизнь за обозримое время, хотя они и не имеют пока еще достаточно сторонников для серьезной проработки.

Гибридные реакторы и ядерная энергетика

Идеология «чистого» термоядерного синтеза никогда не была в России единственной. Практически с момента начала работ над УТС высказывались идеи об использовании термоядерных нейтронов для производства делящихся изотопов как основы ядерного топлива для АЭС¹ или боеприпасов.

В своих воспоминаниях, относящихся к 1951 г., А.Д. Сахаров пишет: «Важное мое предложение об использовании нейтронов термоядерного реактора для целей бридинга – т. е. для производства при захвате нейтронов урана-233 из тория-232 и плутония-239 из природного урана-238 – вероятно,

¹ АЭС – атомная электростанция.

было сформулировано несколько позже приезда комиссии. Так как выделение энергии на один акт реакции при процессе деления гораздо больше, чем при процессе синтеза, экономические и технические возможности такого комбинированного двухступенчатого производства энергии оказываются выше, чем при получении энергии непосредственно в термоядерном реакторе. Делящиеся материалы производятся при этом в МТР¹ и затем сжигаются в атомных реакторах сравнительно простой конструкции, более простых, чем реакторы на быстрых нейтронах, в которых к тому же накопление делящихся материалов происходит сравнительно медленно» [13].

Сегодня при анализе так называемого «гибридного» подхода, сочетающего термоядерный источник нейтронов (ТИН) и окружающий его бланкет с сырьевым материалом или отработавшим ядерным топливом (ОЯТ), гибридный реактор рассматривают в двух возможных ипостасях: как наработчик топлива для традиционных реакторов деления, используемых на существующих или планируемых АЭС, и как высокоэффективный дожигатель минорных (младших) актинидов, накапливающихся в результате работы ядерных реакторов.

Главное преимущество гибридного реактора по сравнению с любой другой ядерной установкой, обеспечивающей конверсию сырьевых изотопов в делящиеся и/или переработку миноров, заключается в использовании термоядерных нейтронов высокой энергии. Это позволяет в несколько раз увеличить интенсивность процессов наработки новых делящихся изотопов из сырьевых или переработки ОЯТ при одинаковой мощности установок. Такое важнейшее качество приводит к тому, что присутствие гибридных термоядерных реакторов в структуре ядерной энергетической системы можно ограничить небольшой долей (менее 10–15 %) и при этом в полном объеме решить проблему обеспечения топливом.

Реакторы деления, составляющие основу существующей атомной энергетики, будут обеспечены делящимися изотопами, произведенными в гибридных реакторах. Важно, что бланкет гибридного реактора работает в подкритическом режиме с внешним источником нейтронов, что исключает последствия запроектных аварий с изменением мощности (реактивные аварии) и с захолаживанием теплоносителя без срабатывания систем защиты.

¹ Магнитный термоядерный реактор (МТР – принятая в то время аббревиатура).

Оценки показывают, что наибольший эффект в продвижении интегрированной (синтез-деление) технологии топливного цикла реализуется при ориентации на уран-ториевый топливный цикл, к числу преимуществ которого принято относить следующие.

1. Уран-233 – делящийся изотоп, получаемый из природного тория, наиболее привлекателен для реакторов на тепловых нейтронах. Запасы тория-232 в природе в три-четыре раза больше в сравнении с природным ураном. При добыче тория радиационные нагрузки на окружающую среду принципиально меньше в сравнении с аналогичными, существующими при добыче природного урана.

2. Облучение урана-233 в реакторе не сопровождается накоплением трансурановых актинидов, и проблема трансмутации минорных актинидов с целью создания условий экологической приемлемости современного уран-плутониевого цикла практически устраняется.

Вместе с тем, хотя возможность использования ториевого цикла была известна и обсуждалась ещё на заре становления ядерной энергетики, исторически сделанный выбор в пользу уран-плутониевого цикла нельзя сбрасывать со счетов, равно как и определённые трудности, связанные с реализацией ториевого цикла.

Варианты продвижения гибридной концепции [14–17] с целью перехода к «зелёной» ядерной энергетике достаточно проработаны. Известны и контраргументы (см., например, [18]), количественные ответы на которые могут быть получены посредством проведения соответствующих исследований. В любом случае, эту концепцию следует рассматривать в увязке с экономикой и с ключевыми проблемами атомной энергетики по обеспечению её устойчивого развития и замыкания топливного цикла.

Особенность настоящего момента заключается в том, что современный уровень знаний и имеющиеся наработки в области УТС достаточны для создания ТИН, требования к параметрам плазмы и к конструкционным материалам в котором заметно ниже, чем для энергетического реактора и возможность удовлетворения которых уже подтверждена на экспериментах. Помимо создания ТИНа также необходимы обеспечивающие работы, подтверждающие работоспособность элементов blankets, технологии подготовки / очистки / переработки его топливной композиции, технологии наработки трития.

В национальных интересах

Парадоксом постсоветского периода в области термоядерной науки и техники стало участие Российской Федерации в крупнейшем научно-техническом проекте современности – разработке и строительстве международного токамака-реактора ИТЭР – в отсутствие собственной национальной программы развития термоядерных исследований.

В соответствии с заключёнными для реализации проекта ИТЭР международными соглашениями каждый партнёр, в том числе Российская Федерация, имеет право на получение безвозмездных лицензий на использование технологий, созданных в рамках проекта ИТЭР для собственных (национальных) целей. Поэтому все участники проекта ИТЭР (кроме России) имеют собственные национальные программы и проекты, финансируемые на уровне, превышающем вклады этих стран в проект ИТЭР. Такие национальные программы необходимы, кроме всего прочего, для освоения и использования полученных при строительстве и последующей эксплуатации ИТЭРа результатов и технологий.

В начале 2016 г. на обращение Президента НИЦ «Курчатовский институт» М.В. Ковальчука к главе государства было получено поручение о подготовке национальной программы развития управляемого термоядерного синтеза и плазменных технологий. Сегодня элементы этой программы образовали федеральный проект «Термоядерные и плазменные технологии» в составе комплексной программы «Развитие техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии в Российской Федерации на период до 2024 года», разработанной Госкорпорацией «Росатом» в соответствии с Указом Президента Российской Федерации от 16.04.2020 № 270. Реализация комплексной программы начинается с 2021 г.

Средства федерального бюджета, выделяемые на реализацию данного федерального проекта (далее – ФП), фактически являются единственным источником системного финансирования отечественных исследований в области УТС в ближайшие 4 года.

Заметим, что наряду с описанными выше *базовыми* термоядерными технологиями (а технологии ввода энергии и частиц в плазму, защиты первой стенки, а также системные исследования по фундаментальным вопросам равновесия, устойчивости, процессов переноса, управления разрядом применительно к высокотемпературной плазме в режиме термоядерного

горения являются универсальными и необходимыми для любых термоядерных устройств) и технологиями *гибридного реактора* (в рамках которых на передний план выходят вопросы работоспособности элементов blankets, нейтронной стойкости материалов и обоснование топливного цикла), в рамках ФП предполагается развитие *инновационных плазменных технологий*, способных продемонстрировать возможность планового внедрения выполняемых разработок и их востребованность нынешним промышленным комплексом страны.

Здесь речь идёт о создании плазменных ракетных двигателей нового поколения, мощных источников электромагнитного излучения различного спектрального диапазона и назначения, источников интенсивных атомарных и ионных пучков для различных применений и других образцов новой техники.

Кроме того, при взаимодействии с МАГАТЭ на основе проведённых научно-исследовательских работ будет создана *основа нормативной базы*, регламентирующей полный жизненный цикл термоядерных и гибридных систем, работающих в нейтронных режимах, а также соответствующая мировому уровню система информационного и проектного обмена участников проекта и укреплена база для систематической подготовки кадров в области термоядерных исследований.

Заключение

Подводя итог, следует отметить, что перспективы развития термоядерных исследований как в нашей стране, так и во всём мире тесным образом связаны с тем, в какой мере человечество намерено следовать идеям минимизации негативного воздействия на окружающую среду, сокращения выбросов углекислого и иных парниковых газов, накопления вредных отходов и т.п.

Можно только присоединиться к часто цитируемым словам одного из первых руководителей термоядерных исследований в нашей стране академика Л.А. Арцимовича: «Эта проблема (проблема УТС. – *Прим. авторов*) обязательно будет решена, когда термоядерная энергия будет совершенно необходима человечеству, потому что принципиальных затруднений на этом пути, по-видимому, нет».

Исследования, проведённые за прошедшие десятилетия, действительно не выявили принципиальных затруднений (т.е. запретов со стороны физической науки). Более того, большинство казавшихся непосильными трудностей были

успешно преодолены усилиями учёных и инженеров. Вместе с тем, хотя очевидной потребности в термоядерной энергетике, в том числе потребности экономической, в настоящее время не существует ни в виде самостоятельной компоненты, ни в паре с традиционной ядерной энергетикой, несмотря на прогнозируемые достоинства такого симбиоза, задача научных и инженерных исследований в области УТС заключается в необходимости сохранения профессиональных компетенций и обеспечения должной степени технологической готовности к возникновению такой потребности.

Передовые научные достижения в конечном счёте формируют новые рынки, а не расширяют продажи на рынках существующих. С этой точки зрения крайне важно, что термоядерные исследования ведутся на пределе имеющихся технологических возможностей, выступая уже сегодня технологическим драйвером развития наукоёмких отраслей промышленности.

В заключение выражаем признательность всем коллегам по «термоядерному цеху», в первую очередь членам НТС-6 Госкорпорации «Росатом», сотрудникам НИЦ «Курчатовский институт», отраслевых институтов Росатома и институтов РАН, работа которых позволила сформировать федеральный проект «Термоядерные и плазменные технологии» и обеспечит безусловное выполнение запланированных в нём мероприятий. Отдельная признательность одного из авторов (ВИИ) – С.В. Мирнову и Л.Н. Химченко за полезные обсуждения.

Литература

1. Jassby D. Fusion confusion // <https://beyondnuclearinternational.org/2019/05/12/fusion-confusion/>
2. Мирнов С.В. Токамаки: триумф или поражение? // Природа. 1999. Вып.11. С. 10–22; вып.12. С. 26–37.
3. Велихов Е.П., Смирнов В.П. Состояние исследований и перспективы термоядерной энергетике // Вестник РАН. 2006. Т. 76 (5). С. 419–426.
4. Стрелков В.С. Термоядерная энергетика: 60 лет исследований. Что дальше? // Вопросы атомной науки и техники. Термоядерный синтез. 2016. Т. 39 (1). С. 5–14.
5. Ильгисонис В.И. Ключи к дверям будущего: отраслевая наука как фундамент национальной безопасности // Вестник Атомпрома. 2020. Вып.1. С. 54–61.
6. В.Д. Шафранов. Первый период истории термоядерных исследований в Курчатовском институте // УФН. 2001. Т. 171 (8). С. 877–886.

7. Ильгисонис В.И. Классические задачи физики горячей плазмы / М.: Изд. дом МЭИ. 2015. 326 с.
8. Keilhacker M., Gibson A., Gormezano C., Rebut P.H. The scientific success of JET // Nucl. Fusion. 2001. Т. 41 (12). P. 1925–1966.
9. Progress in the ITER Physics Basis. Ed. K. Ikeda. Nucl. Fusion. 2007. V. 47 (6).
10. Politzer P.A. The Bootstrap Current and Neutral Beam Current Drive in DIII-D // Fusion Science and Technology. 2005. V. 48 (2). P. 1170–1177.
11. Mirnov S.V. Tokamak evolution and view to future // Nucl. Fusion. 2019. V. 59 (1). 015001 (15 pp.)
12. Захаров Л.Е. Виталий Д. Шафранов и необходимые условия для термоядерного синтеза // Физика плазмы. 2019. Т. 45(12). С. 1059–1064.
13. Сахаров А.Д. Воспоминания. в 2 т. / ред.-сост.: Е. Холмогорова, Ю. Шиханович. – М.: Права человека. 1996. Т. 1. Ч. 1. Гл. 1. С. 201.
14. Велихов Е.П., Азизов Э.А., Алексеев П.Н. и др. // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2013. Т. 36 (1). С. 5 – 16.
15. Велихов Е.П., Ковальчук М.В., Азизов Э.А. и др. Гибридный термоядерный реактор для производства ядерного горючего с минимальным радиоактивным загрязнением топливного цикла // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2014. Т.37 (4). С. 5–12.
16. Велихов Е.П., Ковальчук М.В., Ильгисонис В.И. и др. Ядерная энергетическая система с реакторами деления и синтеза – стратегический ориентир развития отрасли // ВАНТ. Сер. «Термоядерный синтез». 2017. Т. 40 (4). С. 5–13.
17. Велихов Е.П., Ковальчук М.В., Ильгисонис В.И. и др. Эволюционное развитие атомной энергетики в направлении крупномасштабной ядерной энергетической системы с реакторами деления и синтеза // Энергетическая политика. 2017. Вып. 3. С.12–21.
18. Орлов В.В., Пономарёв Л.И. Ядерные проблемы термоядерной энергетики // Атомная энергия. 2018. Т.124 (2). С. 105–113.

АТОМНО-ВОДОРОДНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

Рост энергопотребления и тренд на декарбонизацию стимулируют становление нового технологического уклада – водородной энергетики, подразумевающей производство и потребление водорода в качестве энергоносителя, накопителя энергии и компонента промышленных технологий.

Анализ динамики глобального энергопотребления и соотношения удельного потребления первичной энергии развитых и развивающихся стран показывает существенное изменение этого соотношения за последние полвека (рис. 1) [1].

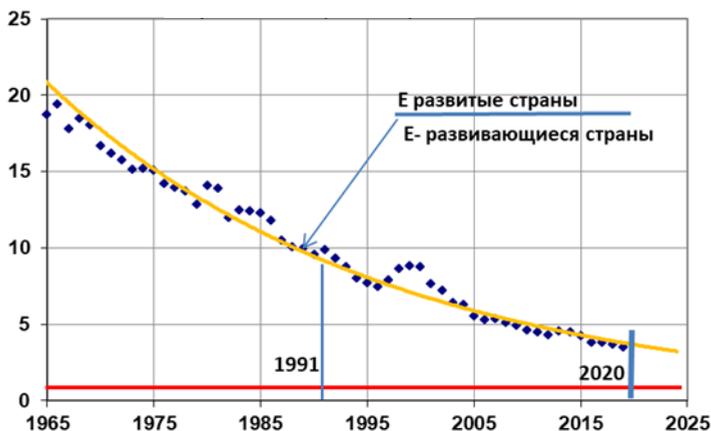


Рис. 1. Отношение удельного потребления энергии в развитых и развивающихся странах

Примерно в середине прошлого века удельное потребление первичной энергии в развитых и развивающихся странах отличалось более чем в 20 раз. В 1990-х годах эта разница сократилась до 10 раз. Происходит сближение уровня энергопотребления в разных странах мира, и эта тенденция будет сохраняться. Выравнивание идёт не за счёт перетока энергии из развитых стран, а путём опережающего наращивания энергопотребления развивающимися странами. При сохранении этого тренда с учётом роста населения

¹ Научный консультант генерального директора АО «Концерн Росэнергоатом», академик РАН.

глобальные потребности в энергопотреблении могут вырасти в 2–3 раза к середине века.

Наряду с наращиванием использования первичных энергетических ресурсов следует ожидать изменения технологического уклада. Одним из признаков таких изменений станет использование водорода как более приспособленного источника энергии по сравнению с углеродным топливом для энергоснабжения рассредоточенных потребителей. Замещение водородом углеродных топлив обеспечит выполнение требований декарбонизации. Наиболее эффективной эта тенденция может оказаться для экономики развивающихся стран.

Масштабное развитие возобновляемых источников энергии (ВИЭ) – солнца, ветра – с учётом характерных для них низких коэффициентов использования установленной мощности (КИУМ) требует сочетания с накопителями энергии. Водород как накопитель энергии – наиболее эффективный претендент для выполнения этих задач. Причём интересен он в сочетании с АЭС, требования к регулированию мощности которых будут со временем усиливаться.

Выполнение требований декарбонизации особенно важно для транспортных систем – автомобилей, автокаров, судов, поездов, авиации и ракет. Здесь водород будет конкурировать с аккумуляторами электроэнергии и его использование может оказаться предпочтительным. Кроме того, будет возрастать роль водорода как химического элемента в промышленных технологиях – нефтепереработке, нефтехимической и химической промышленности (метанол, этилен, аммиак, удобрения, полимеры), металлургии (прямое восстановление и получение чистых металлов).

Таким образом, водород и его переделы – востребованный товар. При этом ключевой проблемой водородной энергетики остаётся экологически чистое производство водорода с использованием таких же безуглеродных источников энергии.

Применение атомной энергии не только для производства электроэнергии и тепла, но и водорода кардинально решает данную проблему.

База знаний атомно-водородной энергетики

Основа технологий, необходимых для водородной энергетики, была заложена на первой стадии Атомного проекта. Уже в 1947 г. начался поиск

путей применения реакторов для энергетических целей [1]. В 1947–1948 гг. специалисты представили первые предложения по использованию высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов (ВТГР) с гелиевым теплоносителем для АЭС, флота и авиации.

С 1950 г. начались систематические исследования по созданию атомных самолётов, ядерных ракетных двигателей, а затем и космических ядерных установок [2, 3]. Для атомных самолётов были проработаны прямоточные и турбореактивные двигатели с высокотемпературными реакторами для нагрева воздуха.

В середине 1950-х годов специалисты приступили к созданию ядерных ракетных двигателей (ЯРД) с использованием в качестве рабочего тела водорода. Созданы реакторы и стенды для испытаний тепловыделяющих элементов и тепловыделяющих сборок реакторов ЯРД – ИГР и ИВГ-1, а также стендовый вариант реактора ЯРД минимальных размеров – ИРГИТ (рис. 2).



Рис. 2. Реактор ИРГИТ

При испытаниях на ИГР, ИВГ-1 и ИРГИТе были получены важные результаты: плотность тепловыделения в тепловыделяющих элементах (ТВЭЛах) достигала 30 кВт/см^3 , температура нагрева водорода – до 3100 К , суммарное время испытаний многих тепловыделяющих сборок составляло 4000 с . Реактор ИРГИТ работал на мощности 90 МВт при температуре водорода 3000 К . США, разработав и испытав более десяти полноразмерных реакторов, не смогли получить таких параметров.

В начале 1960-х годов были развернуты работы по прямому преобразованию тепловой энергии ядерного реактора в электричество для космических целей с использованием термоэлектрических и термоэмиссионных преобразователей. Эти реакторы прошли испытания на стендах и нашли применение в космических аппаратах.

Исследования выполнялись специалистами Института атомной энергии им. И.В. Курчатова (ныне – НИЦ «Курчатовский институт») в кооперации с исследовательскими, конструкторскими, технологическими и промышленными предприятиями ряда министерств – среднего машиностроения, общего машиностроения, энергетики, химической промышленности, чёрной металлургии, авиационной промышленности и Академии наук СССР.

Широко известна фотография «Три К» (И.В. Курчатов, С.П. Королев, М.В. Келдыш), символизирующая сотрудничество атомной и космической отрасли с Академией наук. Уникальные результаты этого сотрудничества могут пригодиться и сегодня при разработке технологий водородной энергетики.

С начала 60-х годов в Курчатовском институте на основе анализа путей развития энергетики, структуры глобальной энергетики, топливных балансов и ресурсов топлива формулируется стратегия долгосрочного развития атомной энергетики, ее место в энергетике страны и мира, и структура крупномасштабной атомной энергетики будущего. Была обоснована многокомпонентная структура атомной энергетики, включающая замкнутый топливный цикл с расширенным воспроизводством топлива в реакторах – бридерах, использование избыточного топлива, нарабатываемого бридерами в тепловых реакторах, расширение областей использования ядерной энергии помимо электричества.

В середине 1970-х годов по инициативе президента Академии наук СССР, директора Института атомной энергии им. И.В. Курчатова академика А.П. Александрова совместно с рядом министерств и ведомств была разработана и принята программа научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по широкому внедрению водородной энергетики в народное хозяйство [4–7]. Концепция водородной энергетики с атомным производством водорода получила название «Атомно-водородная энергетика» [8]. Она предусматривала расширение использования ядерной энергетики для энергоёмких отраслей химической, металлургической, строительной, топливной промышленности, теплоснабжение распределённых потребителей с хемотермической передачей энергии и, конечно, крупномасштабное производство пресной воды.

Основываясь на опыте начальных этапов разработки высокотемпературных реакторов для специальных назначений и энергетики, были

разработаны проекты опытно-промышленных установок с высокотемпературными гелиевыми реакторами (ВГР-50, ВГ-400, ВГМ-200, МВГР-ГТ, ВТГР-10) в широком диапазоне мощностей, модульные и блочные конструкции, рассмотрены конструкции реакторов в металлическом и железобетонном корпусах. Проектно-конструкторские работы сопровождались экспериментально-стендовой отработкой технических решений и основного оборудования. С этой целью в институтах и конструкторских бюро была создана лабораторная и стендовая база. Особое внимание уделялось исследованиям, разработке и испытаниям ТВЭЛов на основе микротоплива, размещаемого в графитовой матрице. На опытно-промышленном производстве было изготовлено около 100 тыс. шаровых ТВЭЛов.

Для решения проблемы расширенного воспроизводства топлива рассматривались гелиевые бридеры (реакторы-размножители) с минимальным временем удвоения ядерного топлива. Выполнены проекты реакторов модульной и блочной концепции [9].

Разработки, связанные с созданием атомной энерготехнологической станции (АЭС) с ВТГР, выполненные Курчатовским институтом, институтами и КБ Минсредмаша (ОКБМ, ПНИТИ, НИКИЭТ, ВНИПИЭТ и др.), Министерства химической промышленности СССР и Министерства чёрной металлургии СССР, послужили основой для принятия Постановления Совета министров СССР №794-191 от 16 июля 1987 г. «О создании и внедрении в народное хозяйство атомных энерготехнологических комплексов на базе ВТГР» (Дмитровград, Кирово-Чепецк, Котлас, Новополюцк и Нижнекамск). База данных суммирована Курчатовским институтом в публикациях серии «Атомно-водородная энергетика и технология» и в монографиях серии «Физико-технические проблемы ядерной энергетики» [10].

Наряду с созданием технологий атомного производства водорода шли работы по различным направлениям его использования. Так, в рамках программы по водородной энергетике КБ Туполева совместно с рядом НИИ и КБ авиационной промышленности создало летающую лабораторию Ту-155, использующую в качестве топлива жидкий водород. На Ту-155 был установлен экспериментальный турбореактивный двухконтурный двигатель НК-88, созданный под руководством академика Н.Д. Кузнецова. Топливный бак, вмещающий 17,5 м³ сжиженного газа, находился в хвостовой части

фюзеляжа в постоянно продуваемом отсеке. Бак, трубопроводы и агрегаты топливного комплекса имели экранно-вакуумную изоляцию, обеспечивавшую заданные теплопритоки. Для обслуживания самолёта был разработан авиационный криогенный наземный комплекс, позволявший проводить различные виды испытаний с использованием большого количества криогенной жидкости. Начиная с 1988 г. выполнено более 100 полётов, из них пять на жидком водороде.

В 1973 г. в Тульском филиале ЦНИИчермет им. И.П. Бардина были созданы лаборатория по использованию атомной энергии в чёрной металлургии и лаборатория прямого получения железа в твёрдой фазе.

В 2001 г. АвтоВАЗ в сотрудничестве с Уральским электрохимическим комбинатом при участии РКК «Энергия» разработал водородомобиль «Антэл-1» на базе ВАЗ-2131 «Нива».

В декабре 2003 г. стартовала Комплексная программа поисковых, научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по водородной энергетике и топливным элементам, разработанная Российской академией наук и компанией «Норильский никель», которая предусматривала кооперацию более 50 научно-исследовательских институтов РАН, Курчатовского института, Ракетно-космической корпорации «Энергия» им. С.П. Королёва, Исследовательского центра им. М.В. Келдыша, МГУ им. М.В. Ломоносова и других учреждений для производства конкурентоспособных энергетических установок с использованием водородных технологий.

Международное сотрудничество в области ВТГР

В ходе разработки проектов высокотемпературных газовых реакторов большое внимание уделялось международному сотрудничеству с МАГАТЭ и взаимодействию с ведущими научными центрами и фирмами различных стран. Российские специалисты активно участвовали в мероприятиях Технической рабочей группы по газоохлаждаемым реакторам (ТРГ-ГР), которая была создана МАГАТЭ в 1978 г. для содействия обмену технической информацией, координации исследований и международного сотрудничества в области газоохлаждаемых реакторов.

Международный форум «Поколение IV» (МФП) – инициатива, которая объединяет 13 стран, ориентирующихся на развитие ядерно-энергетических

технологий следующего поколения, – включает проект по базовым НИОКР ВТГР: топливо и топливный цикл; материалы; компьютерные методы, валидация и бенчмаркинг; производство водорода.

Актуальность присоединения России к МФП в сфере высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов обуславливается решениями Госкорпорации «Росатом» о развитии нового стратегического направления «Водородная энергетика», ключевым компонентом которого является крупномасштабное производство водорода на основе ВТГР для России и на экспорт. Обмен такой информацией будет способствовать расширению базы знаний по ВТГР, а также снижению технического риска и сроков при разработке водородных технологий в нашей стране.

Рассмотрим несколько примеров успешного взаимодействия с ведущими научными центрами и энергетическими компаниями различных стран по вопросам ВТГР.

Одна из целевых задач проекта реактора HTR-Modul, реализуемого с 1988 года в сотрудничестве с Siemens-KWU/Interatom (Германия), – сократить объём активных систем защиты, используя присущие ВТГР свойства безопасности, в частности, устойчивость к авариям типа RIA (Reactivity Initiated Accident), при которых происходит неконтролируемое введение избыточной реактивности в активную зону из-за неисправности системы регулирования или других причин, а также LOCA (Loss of Coolant Accident), когда происходит потеря теплоносителя при мгновенном разрыве трубопровода первого контура ядерной энергетической установки.

HTR-Modul мощностью 200 МВт(т) предназначен для производства технологического тепла различных промышленных систем. Результаты этого сотрудничества нашли практическое применение при разработке технического проекта реакторной установки ВГМ мощностью 200 МВт (т), выполненного в 1992 г. с экспериментальной отработкой основного оборудования на гелиевых стендах.

К одним из наиболее продвинутых относится международный проект модульного высокотемпературного газоохлаждаемого реактора с прямым газотурбинным циклом ГТ-МГР мощностью 600 МВт, который разрабатывался с 1998 по 2012 г. совместными усилиями российских институтов и компанией «General Atomics» (США) с участием «Framatome» (Франция) и «Fuji Electric» (Япония).

В рамках международного сотрудничества удалось усовершенствовать ряд отечественных проектов ВТГР, восстановить кооперацию российских предприятий, восполнить компетенции по ключевым компонентам, включая расчётные коды. Технические решения ГТ-МГР были использованы при разработке проекта МГР-Т, предназначенного для генерации электроэнергии, тепла и водорода на базе четырёх модульных высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов единичной мощностью 600 МВт. Концептуальный проект и его экономическое обоснование завершены в 2004 году.

В 1998 году южноафриканская энергетическая компания «Escom» выразила заинтересованность в кооперации с российскими специалистами по проекту модульного высокотемпературного реактора с шаровыми ТВЭЛами RBMR. В рамках двустороннего сотрудничества российской стороной были выполнены работы по концепции топлива ВТГР, технологиям изготовления и реакторным испытаниям шаровых ТВЭЛов. В НИЦ «Курчатовский институт» на критическом стенде «Астра» прошли экспериментальные исследования нейтронно-физических характеристик высокотемпературного газоохлаждаемого реактора с кольцевой активной зоной.

С 2002 г. совместно с научными центрами Комиссариата по атомной энергии Франции (СЕА) идут системные исследования быстрых реакторов с гелиевым теплоносителем и областей неэлектрического применения газоохлаждаемых реакторов.

В частности: изучены различные способы производства водорода и эффективность технологий атомно-водородной энергетики; рассмотрены технологии передачи тепла от реактора к комплексу по производству водорода; проанализированы вопросы безопасности, связанные с взаимным влиянием реактора и технологического производства.

Во исполнение решений Российско-Китайской подкомиссии по ядерным вопросам проходят регулярные встречи специалистов пекинского Института ядерно-энергетических технологий (INET) и российских организаций по сотрудничеству в сфере ВТГР. Стороны обмениваются мнениями и определяют приоритетные направления исследований в этой области.

Мировое развитие водородных технологий

Государства – признанные технологические лидеры в разработке и внедрении технологий водородной энергетики, базируясь на оснаждающих

результатах фундаментальных и поисковых исследований, первых демонстрационных проектах, в 1990-е – начале 2000-х годов запустили в своих странах полномасштабные долгосрочные программы развития водородной энергетики. Такие национальные программы и/или зафиксированные меры поддержки этого направления сегодня имеют более 30 стран [11–15].

В 2020 г. Еврокомиссия разработала и представила на утверждение Европарламенту важнейший документ «Водородная стратегия для климатически нейтральной Европы» [16]. Согласно этой стратегии, на первом этапе (до 2024 г.) планируется установить в ЕС как минимум 6 ГВт генерирующих установок (электролизёров) с использованием ВИЭ. С 2025 по 2030 г. производство водорода планируется повысить до 10 млн т. Водород, по мнению Еврокомиссии, должен стать неотъемлемой частью интегрированной энергосистемы и применяться в отраслях, где электрификация на основе ВИЭ невозможна, дороже или менее эффективна, в частности, на транспорте и в промышленности.

Германия, весьма успешно разрабатывающая и экспортирующая технологии по производству водорода и технологии Power-to-X, при которых электрическая энергия используется для производства иных энергоносителей, например водорода, ставит перед собой задачу стать мировым лидером в данной области. Федеральное правительство этой страны оценивает потребность в водороде в 90–110 ТВт·ч к 2030 г. Для достижения таких показателей необходимо построить до 2030 г. генерирующие установки общей мощностью 5 ГВт, добавив к 2035–2040 гг. ещё 5 ГВт мощности.

В рамках так называемого «пакета будущего», принятого коалиционным комитетом, инвестиции в водородную индустрию составят 9 млрд евро, из которых 2 млрд евро предусмотрены на проекты, реализуемые в рамках международного партнёрства.

К мерам стимулирования производства водорода относят также освобождение от пошлин электроэнергии, генерируемой солнечными и ветровыми электростанциями, а также введение платы за выделяемый углекислый газ при использовании традиционных источников энергии. Немецкие компании начинают осуществлять масштабные инвестиции в создание водородных технологий, что привлекает к проблеме ещё больше внимания. В силу ограниченных возможностей использования электроэнергии из возобновляемых источников в среднесрочной и долгосрочной перспективе

Германии придётся импортировать большие количества водорода. Здесь открываются многочисленные пути для сотрудничества со странами, обладающими богатым ресурсным потенциалом, к которым, несомненно, относится Россия.

Некоторые международные проекты, например, построение транснациональной цепочки создания добавленной стоимости применительно к водороду, уже реализуются.

Координация программ по водородной энергетике осуществляется на межгосударственном уровне. Регулярно проводятся министерские встречи по водороду, на которых принимаются решения о содействии сотрудничеству в области водородных технологий. В итоговых документах подчёркивается, что водород, будучи важным компонентом широкого, безопасного, устойчивого и эффективного энергетического портфеля, может быть ключевым фактором энергетического развития и способствовать переходу к экологически чистому энергетическому будущему. Так, 28–29 июня 2019 г. на Саммите G-20 в Осаке (Япония) в совместном коммюнике подчеркнута важность использования в качестве топлива водорода, а также создания систем улавливания и хранения углерода [17].

В 2003 г. ведущие страны мира, включая Россию, образовали Международное партнёрство по водородной экономике (МПВЭ) для координации усилий и совместного решения проблем водородной энергетике. В программах стран – участниц МПВЭ, как правило, присутствуют три основных направления: производство водорода, обращение с водородом (транспортировка, хранение, безопасность, техническое регулирование) и конечное его использование (автомобили, локальное энергоснабжение, накопители энергии).

В январе 2017 г. на Всемирном экономическом форуме в Давосе был создан Совет по водородным технологиям (Hydrogen Council) – крупнейшее объединение нескольких десятков ведущих энергетических, транспортных, промышленных и инвестиционных компаний с единым и долгосрочным видением развития водородной экономики [18]. Его основная цель заключается в ускоренных инвестициях в систему водородной экономики, включая транспорт, промышленность, использование водорода, его производство и распределение. Суммарная рыночная капитализация этих компаний – более чем 1,15 трлн долл.

В итоговых документах, принятых на Международной научной конференции «Атомэкспо», состоявшейся в мае 2019 г., отмечено, что водородная энергетика может стать новым глобальным рынком для атомной отрасли. Работы в этой области необходимо вести комплексно, делая основную ставку на крупномасштабное производство водорода в сочетании с работами в области хранения, транспортировки, использования водорода и обеспечения водородной безопасности.

Водород и его переделы – востребованный товар

Исключительные свойства водорода как энергоносителя и компонента различных технологических процессов раскрывают перспективу его применения в различных областях энергетики, на транспорте и в промышленности.

Если ранее потребителей энергии привлекали в основном его энергоёмкость, способность к хранению и распределению, то сейчас и на перспективу ключевым фактором становится его экологическая чистота и возможность декарбонизировать транспорт, химическую, нефтехимическую, металлургическую промышленность и коммунальный сектор. Водород сегодня рассматривается различными государствами и фирмами как ключевой энергоноситель будущего, перспективный товар.

В настоящее время потребление водорода в мире составляет около 70 млн т/год. Крупнейшие потребители (до 90% общего объёма) – химическая и нефтеперерабатывающая отрасли промышленности. Но это в основном «самодельный» водород, производимый с выбросами в атмосферу CO₂. В ближайшие десятилетия ожидается резкий рост потребления водорода в связи с переходом базовых отраслей промышленности на новые безуглеродные технологии и развитием экологически чистого транспорта с учётом требований сокращения углеродных загрязнений атмосферы.

Наибольший вклад в рост мирового спроса на водород следует ожидать от транспорта и систем рассредоточенного энергоснабжения при использовании водородных топливных элементов. При масштабном освоении технологий производства, транспортировки и хранения водород может быть использован и для решения проблем энергетики: распределение энергии по секторам, регионам и как буфер-накопитель. Например, это аккумулирование энергии в энергосистемах с неравномерным графиком нагрузок, особенно для АЭС,

буфер-накопитель энергии в сочетании с ВИЭ, энергоснабжение локальных потребителей и дальнейшее теплоснабжение.

Оценки масштаба мировой потребности в водороде как на ближнем горизонте, так и на дальнюю перспективу весьма неоднозначны. Ориентируясь на детализированный анализ использования водорода для широкого круга пользователей, приведенный в [8, 17, 18] в качестве целевых ориентиров, можно утверждать, что к середине XXI века мир будет потреблять 500 млн т водорода в год, что означает приблизительно восьмикратное увеличение потребностей в водороде. Это составит около 20% доли в энергетическом балансе и обеспечит 25%-ный вклад в снижение выбросов CO₂.

К 2030 году основные потребители должны подтвердить на рынке масштаб своих потребностей в водороде. По нынешним оценкам, спрос будет составлять около 100 млн т водорода в год. Реализация такой программы внесёт весьма значительный вклад в снижение загрязняющих атмосферу выбросов. Одновременно это огромные привлекательные финансовые потоки и создание новых рабочих мест. Неслучайно водород воспринимается как весьма востребованный продукт будущего.

Производство водорода – ключевая проблема водородной энергетики

Сырьевые ресурсы водорода практически неисчерпаемы – вода и углеводороды. Но для выделения водорода из этих соединений необходимо затратить энергию. Экологическая чистота водорода определяется как технологией его выделения из воды и углеводородов, так и чистотой потребляемой энергии. Использование для этого атомной энергии и ВИЭ обеспечит экологическую чистоту и необходимые масштабы производства водорода из воды и углеводородов.

В ближайшем будущем вклад в масштабное производство водорода с использованием углеводородного сырья будет основным. Однако экологические ограничения процесса паровой конверсии метана с выбросом продуктов сгорания в атмосферу стимулируют разработку и применение промышленных процессов с использованием воды и экологически чистых источников энергии – атомных реакторов и ВИЭ.

Разложение воды. Среди способов получения водорода из воды наибольший интерес в контексте атомно-водородной энергетики представляют электролиз и термохимические циклы.

Технология электролиза хорошо освоена. На всех российских АЭС используются щелочные проточные электролизные установки СУЭ-20, HySTAT-A-1000D/30/10, СУЭ-20/G32, производящие водород для собственных нужд. В связи с ростом суточных и сезонных диспетчерских ограничений мощности рассматривается возможность повышения КИУМ за счёт электролизного производства водорода. Основным недостатком – низкая эффективность использования первичной энергии и высокая стоимость электролизного водорода, которая в несколько раз выше стоимости водорода, производимого традиционными промышленными методами паровой конверсии метана.

В мире и в нашей стране проводятся исследования и разрабатываются технологии, нацеленные на повышение выхода водорода на кВт·ч затраченного электричества, снижение удельной стоимости электролизёров, и, что существенно, прорабатываются пути снижения цены потребляемой ими электроэнергии.

В Научно-производственном объединении «Центротех» (г. Новоуральск Свердловской обл.) разрабатывается матричный щелочной электролизёр без циркуляции электролита и драгметаллов на отечественных материалах и комплектующих [19]. Состав электролизного элемента аналогичен составу топливного элемента, что позволяет использовать единую производственную базу. Его показатели: энергопотребление – менее 4,5 кВт·ч/нм³, давление – до 250 бар, КПД – более 70%, ресурс – 60 000 ч, диапазон изменения мощности – от 0 до 150%. Конструкция батареи электролизного элемента аналогична батарее электрохимического генератора. Электролизная установка производительностью до 1000 нм³/ч состоит из 5 модулей по 200 нм³/ч.

Высокотемпературный электролиз – это процесс электролиза, при котором часть энергии, необходимой для расщепления воды, вкладывается в виде высокотемпературного тепла в нагрев пара, делая процесс более эффективным. Проработана концепция стыковки высокотемпературного электролизёра с ВТГР, дающая суммарный КПД производства водорода из воды до 50%. Высокотемпературная часть тепла от реактора передаётся через высокотемпературный теплообменник к пару, перегревая его до 800 °С. Часть тепла реактора с более низкой температурой преобразуется в электрическую энергию в газотурбинном или паротурбинном цикле. Для перегрева пара до 800 °С гелий на выходе из реактора должен иметь температуру не ниже 900 °С.

Эффективность высокотемпературного электролиза зависит от цены электроэнергии и температуры потребляемого тепла.

В термохимическом процессе получения водорода используется цикл реакций с химически активными соединениями, например, брома или йода в сернокислотном цикле.

В 1990-е и нулевые годы в ведущих странах мира этому процессу уделялось внимание как технологии производства водорода из воды с использованием тепла ВТГР. Выбор оптимального процесса определяется рядом критериев, важнейшие среди них – термодинамическая эффективность цикла, кинетические характеристики отдельных реакций, доступность и стоимость реагентов, совместимость реагентов и конструкционных материалов, безопасность процесса, экологические соображения и в конечном счете экономические показатели. Исследования показали, что получение высокой термодинамической эффективности (КПД = 50%) в производстве водорода требует работы основных агрегатов термохимического цикла при температуре около 900 – 1000 °С и соответствующей температуры тепла на выходе из реактора. Надёжных решений к настоящему времени не предложено.

Разложение метана. Затраты энергии в реакции разложения метана составляют 37,4 кДж/моль, что в 6,5 раз меньше, чем при электролизе воды (242,8 кДж/моль). Это стимулирует поиск и разработку технологий производства водорода путём разложения метана.

Наиболее очевидный путь – *термическое разложение метана*. Исследования нацелены на создание экологически чистой, без выбросов CO₂, технологии каталитического пиролиза углеводородного газового сырья с получением водородсодержащего газа или чистого водорода и углеродного наноматериала в сочетании с атомным источником энергии. Если будут разработаны каталитические композиции, обеспечивающие эффективность процесса получения водородсодержащего газа в режиме низкотемпературного пиролиза метана при температурах 600–800 °С, то можно использовать высокотемпературное тепло ВТГР, и эта технология переходит в разряд экологически чистых. Образующийся при пиролизе метана углерод рассматривается как ценный вторичный продукт.

Кинетические ограничения пиролиза метана становятся незначительными при температурах выше 1700 К. Однако в этом случае для нагрева газа,

при котором используют дуговой, искровой или микроволновый разряд, требуется электроэнергия, что увеличивает затраты первичной энергии в 2–3 раза.

В Исследовательском центре им. М.В. Келдыша на основе опыта создания и использования многоканальных плазменных конверторов проводятся работы по высокотемпературному плазменному термическому пиролизу метана, при котором наряду с водородом образуется ценный продукт – ацетилен. В многоканальном плазменно-дуговом конверторе производится нагрев исходных продуктов до 1600–1900 К и затем вывод прореагировавших продуктов из зоны реакции. Отработан ключевой элемент такого конвертора – трёхфазный электродуговой плазмотрон мощностью 1–2 МВт, продолжительность его работы – сотни часов.

Энергетическая цена получения водорода по ацетиленовому маршруту пиролиза достаточно велика, и экономические показатели производства водорода в этом случае улучшаются, если учесть производство другого ценного продукта – ацетилена.

При *плазменно-каталитическом пиролизе метана* необходимость снижения затрат энергии стимулирует исследования, связанные с влиянием плазменных образований при низких температурах нагрева газа вплоть до величин, достижимых в ВТГР при сохранении высокой удельной производительности и селективности.

В конце 1990-х – начале 2000-х годов в Курчатовском институте были выполнены работы по разложению метана, стимулированному неравновесной плазмой в гомогенных и гетерогенных системах. Специалисты экспериментально подтвердили, что ускорение процесса термического разложения метана можно эффективно осуществить в плазме микроволновых разрядов при температурах 700–900 К. При этом было установлено, что разложение метана идёт почти целиком за счёт тепловой энергии нагретого газа или подводимой к газу в ходе процесса. Расход плазменной энергии при этом оказался относительно невелик. Плазма в данном случае выступала в роли, сходной с ролью традиционного катализатора, – эффект плазменного катализа. В этих экспериментах метан, подогретый до 500–600 °С, обрабатывали плазмой импульсно-периодического микроволнового разряда. На выходе плазменного реактора основным компонентом в остаточном метане служил водород [20, 21]. Из анализа экспериментальных зависимостей

следует, что конверсия происходит в основном за счёт тепловой энергии нагретого метана.

Наиболее вероятный механизм, который объясняет результаты этих экспериментов, связан с образованием в газе под воздействием плазмы заряженных углеродных кластерных ионов, служащих активными центрами для осуществления процессов пиролиза. Эффект плазменного катализа был продемонстрирован и исследован не только для пиролиза метана, но и для паровой, а также парокислородной конверсии углеводородов [22].

Более 70% мирового промышленного крупнотоннажного производства водорода осуществляется путём *паровой конверсии метана* (ПКМ). Для сокращения выбросов CO₂ и экономии природного газа в технологии ПКМ предлагается использовать энергию высокотемпературных реакторов.

Для интеграции ВТГР и химико-технологической части проводятся исследования паровой и парокислородной адиабатической конверсии метана с температурой используемого тепла на начальном этапе 750 °С и его повышением в перспективе до 850–900 °С. При этом решаются проблемы утилизации CO₂, повышения ресурса оборудования и использования отечественных катализаторов, адсорбентов и абсорбентов [23].

Химико-технологическая часть паровой конверсии включает систему очистки природного газа, смеситель очищенного природного газа и водяного пара, аппараты риформинга метана, системы рекуперации тепла, выделения CO₂, обращения с отходами и др. При разработке головной АЭС рассматривается совмещение технологии паровой и парокислородной конверсии метана с относительно небольшим добавлением кислорода в парометановую смесь, что позволяет увеличить уровень температуры конверсионной смеси за счёт экзотермической реакции метана с кислородом и степень его конверсии. Очистка от CO₂ производится путём хемосорбционной очистки газа водным раствором метилдиэтанолamina и последующей регенерацией раствора.

Далее конвертированный газ попадает в блок короткоциклового адсорбции для финальной очистки от примесей, откуда водород высокой чистоты (~99,99%) направляется в промежуточное хранилище или к потребителю, а сдувочный газ (метан и водород со следовыми примесями) – для смешения с природным газом перед блоком сероочистки.

Высокотемпературные гелиевые реакторы – путь к атомно-водородной энергетике

Высокотемпературные реакторы с гелиевым теплоносителем – принципиально новый экологически чистый универсальный источник атомной энергии, уникальные свойства которого – генерация тепла с температурой до 1000 °С и высокий уровень безопасности – определяют широкие возможности его использования для производства электроэнергии с высоким КПД и водорода, снабжения высокотемпературным теплом и электричеством, для технологических процессов в химической, нефтеперерабатывающей, металлургической и других отраслях промышленности, а также для опреснения воды. ВТГР – один из лидеров среди инновационных реакторов будущей ядерной энергетике [24].

В ВТГР в качестве замедлителя и отражателя выступает графит, а топливом служат микровзлы – сердечники-микросферы из керамических композиций урана, плутония или тория, заключенные в контейнер многослойных керамических покрытий. Сочетание в активной зоне теплоносителя гелия, графита и керамического топлива создаёт наиболее благоприятные условия для получения высоких температур, повышения безопасности и эффективности использования топлива. Микровзлы обеспечивают достижение уникальных параметров реактора: высокие температуры нагрева теплоносителя, локализацию продуктов деления и ультравысокие выгорания, в 10 раз превышающие общепринятые в действующих установках. Дробление массы топливного сердечника на множество микрочастиц повышает надёжность и безопасность топлива. Высокая коррозионная стойкость многослойных керамических покрытий служит основанием для долговременного захоронения ОЯТ с топливом такого типа в геологических формациях без переработки. Увеличение числа защитных барьеров, дробление топлива и инертность теплоносителя – гелия – обеспечивают высокую радиационную безопасность. Возможность получения в реакторах с гелиевым теплоносителем высокой температуры делает этот тип реактора наиболее перспективным для комплексного производства электроэнергии и технологического тепла [25].

Модульная компоновка ВТГР эффективна для малых и средних атомных станций с высоким уровнем внутренней безопасности и маневренностью, что важно при сооружении в труднодоступных районах, странах с энергетикой

небольшого масштаба и применении реакторов для технологий. Производство электроэнергии при использовании прямого газотурбинного цикла с КПД ~ 50% сокращает тепловое воздействие на окружающую среду и делает возможным создание сухих градирен.

Благодаря значительной теплоёмкости активной зоны, большому запасу до температуры разрушения и отрицательной обратной связи по температуре и мощности, эти реакторы сохраняют устойчивость при авариях реактивностного типа. Они также не подвержены разрушению при авариях с потерей теплоносителя, что обеспечивается наряду с запасом до температуры разрушения специальной кольцевой конфигурацией активной зоны. Всё это гарантирует пассивный отвод остаточного тепла в окружающую среду без превышения элементами зоны допустимых температур при авариях с потерей теплоносителя.

В 1960-х годах были созданы первые экспериментальные установки с ВТГР: «Драгон» (Великобритания), «Пич-Боттом» (США) и «AVR» (ФРГ). В 1970-е годы построены и введены в эксплуатацию демонстрационные АЭС «FSV» (США) и ТНТР-300 (ФРГ). На стыке столетий введены в эксплуатацию опытные реакторы ВТГР в Японии и Китае. В Китае завершено строительство и ведутся пусковые работы демонстрационного двухреакторного энергоблока НТТР-РМ с единым турбогенератором мощностью 200 МВт.

Россия имеет 45-летний опыт разработки ВТГР малой и средней мощности для производства электроэнергии и энерготехнологического применения. Для обоснования этих проектов создана экспериментальная и технологическая база, на которой проведён большой комплекс работ по исследованию нейтронной физики, теплогидравлики, термомеханики, массопереносу, технологии гелиевого теплоносителя, поведения топлива, в том числе под облучением, графита, конструкционных материалов, элементов конструкции и опытных образцов оборудования. Разработаны основы технологии топлива ВТГР, физики реакторов (рис. 3), конструкция модульного реактора (рис. 4, 5), высокотемпературные парогенераторы и теплообменники, циркуляторы с гелиевым теплоносителем, технология гелиевого теплоносителя, системы пассивной безопасности, расхолаживания, преобразования энергии, модели и коды.

Уровень готовности технологий позволяет в короткие сроки реализовать проект АЭС с ВТГР в России [26].

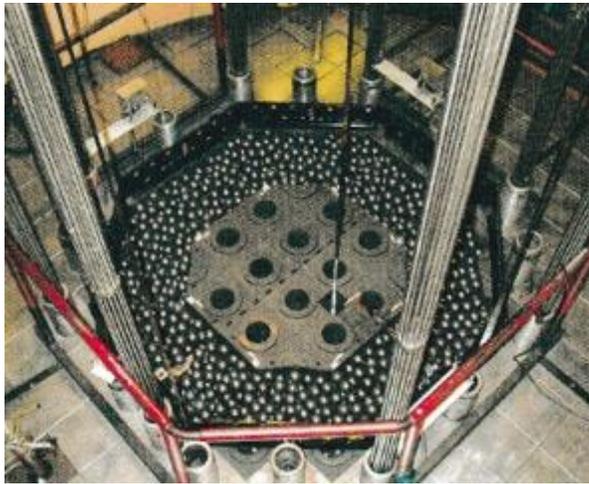


Рис. 3. Стенд «Астра»



Рис. 4. ВТГР-модуль

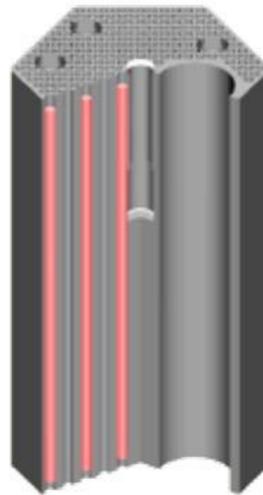


Рис. 5. Активная зона ВТГР

Водород в стратегии «Росатома»

Внедрение атомной энергии в электроэнергетику – наиболее очевидный шаг. В генерации электричества атомная энергия будет и далее наращивать свою долю, конкурируя с традиционным углеродным топливом и ВИЭ.

Более трудная задача – использование атомной энергии в энергоёмких промышленных технологиях, производстве водорода как энергоносителя и безуглеродного топлива, а также как восстановителя и компонента для различных технологических процессов. Актуальность этой задачи обусловлена необходимостью замены углеродов в этой сфере деятельности в объёмах, значительно превышающих их потребление в электроэнергетике.

Потенциальный масштаб неэлектрического использования атомной энергии превосходит атомную электроэнергетику. Если ориентироваться на 10% потенциального рынка водорода, то к середине века потребуется ввести АЭС с установленной тепловой мощностью ~50 ГВт. Это важно не только из-за ограниченности ресурсов углеводородов, но и вследствие требований декарбонизации. Необходимо отметить, что развитие атомно-водородной концепции будет способствовать также снижению риска ядерного распространения благодаря возможности поставок в развивающиеся страны энергоресурсов в виде водорода и его производных вместо ядерных реакторов и ядерных материалов.

Актуальность проблемы и имеющийся задел исследований и технологических разработок открывают путь для реализации в нашей стране атомно-водородной энергетики, признанной приоритетным направлением научно-технологического развития ГК «Росатом».

В связи с этим Госкорпорация инициировала программу НИОКР «Разработка технологий атомно-водородной энергетики для крупномасштабного производства и потребления водорода», которая предусматривает:

- крупномасштабное централизованное производство водорода на атомных энерготехнологических станциях с ВТГР и конверсией природного газа, локальное распределённое производство, включая электролиз на АЭС;
- развитие инфраструктуры (хранение, транспортировка и потребление водорода);
- обоснование безопасности водородной энергетики на всех этапах жизненного цикла (производство, распределение и потребление водорода);
- интеграцию в экономику страны и на международные рынки.

В результате выполнения НИОКР на внутреннем и зарубежном рынках должен появиться новый ключевой высокотехнологичный конкурентоспособный продукт с высокой добавочной стоимостью: водород,

его передель и технологии. Коммерциализация и экспорт этой продукции будут способствовать повышению устойчивости России на внешнем рынке. Потребуется кратный рост масштаба атомной энергетики, её доли в энергобалансе и создание новых рабочих мест в сфере высоких технологий. Кроме того, использование водорода в энергетике, промышленности, коммунальном секторе и на транспорте сократит вредные углеродные выбросы.

Россия, располагая практически неограниченными сырьевыми ресурсами водорода, ядерного топлива и базой знаний по атомным и водородным технологиям, способна и должна занять лидирующие позиции в глобальном безуглеродном производстве водорода с ориентиром на 10% мирового рынка водорода.

Для крупномасштабного экологически чистого производства водорода – нового ключевого продукта атомной отрасли – предлагается создать атомные энерготехнологические станции на основе модульных ВТГР и технологий конверсии природного газа (см. рис. 6). Каждая из них имеет промышленные и опытно-промышленные аналоги.

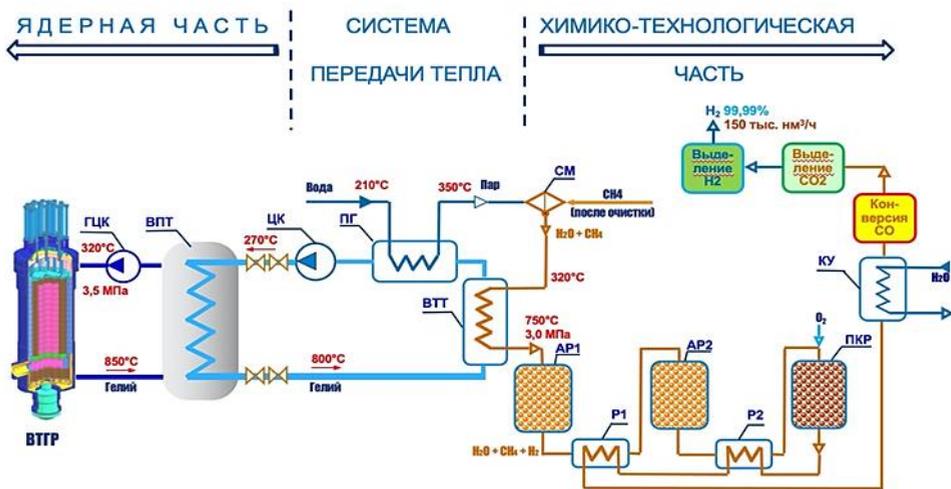


Рис. 6. Блок-схема химико-технологического комплекса АЭС с ВТГР

Объединение этих разнородных технологий в едином атомном химико-технологическом комплексе потребует оптимальных схемных решений и

компромисса при выборе физических, термодинамических, тепло-гидравлических, термомеханических параметров.

При этом необходимо обеспечить экономическую конкурентоспособность производимого водорода, готовность головного блока АЭТС к 2030 г. и гарантировать ядерную, радиационную и водородную безопасность.

На данной стадии проводятся проработки различных вариантов АЭТС. В состав энерготехнологической станции входят четыре блока, в каждом из которых – реакторная и химико-технологическая часть (см. рис. 6). Реакторная установка, расположенная в герметичной оболочке (контейнменте), состоит из модульного высокотемпературного реактора, гелиевого контура и теплообменника. Тепло из реакторной части передаётся через второй контур для нагрева сред технологической части водородного производства.

В варианте паровой конверсии природного газа химико-технологическая часть включает систему подготовки природного газа, смеситель природного газа и водяного пара, аппараты риформинга метана, системы рекуперации тепла, выделения водорода, CO_2 , обращения с отходами и др.

Основные характеристики АЭТС:

тепловая мощность – 4×200 МВт;

температура гелия на выходе из реактора – 850 °С;

отпуск H_2 – 440 млн кг/год;

энергозатраты – менее 2 кВт·ч на 1 кг H_2 ;

потребление метана – 1700 млн nm^3 /год;

утилизация CO_2 – 3,5 млн т/год.

Схема и параметры, в частности уровень температуры, весьма консервативны и это обусловлено намерением создать головной блок в этом десятилетии. С целью повышения эффективности производства водорода предусмотрены НИОКР по улучшению параметров ВТГР (увеличение единичной мощности до 600 МВт, температуры – до 950 °С), а также усовершенствование химико-технологической части (паровая конверсия метана с повышенными температурами и варианты пиролиза метана).

Для локального малотоннажного производства водорода из воды наиболее подготовлена технология электролиза.

Необходимую для этого электроэнергию можно получить на атомных электростанциях с возможным снижением тарифа при диспетчерском регулировании мощности.

Электролизный водород, использующий электроэнергию АЭС, экологически чист. Для атомной станции наличие присоединённой нагрузки в виде электролизного производства водорода представляет интерес, так как при этом обеспечивается возможность её работы на постоянном уровне мощности, что важно при усиливающихся требованиях в маневренных режимах. Один из примеров – Кольская АЭС длительное время недоиспользует несколько сотен мегаватт своей мощности.

Предлагается создать электролизное производство водорода мегаваттного уровня в районе расположения Кольской АЭС в виде Центра компетенций по атомно-водородной энергетике. Его основные цели и задачи:

- отработка технологий повышения эффективности использования установленной мощности АЭС путём электролизного производства водорода и его применения в присоединённых высокотехнологичных производствах и для коммерческих поставок;
- демонстрация использования водорода в качестве накопителя и преобразователя энергии;
- наработка компетенций по электролизному производству водорода, безопасному обращению с ним, его хранению и доставке потребителю;
- тестирование электролизёров ведущих производителей;
- проработка предложений по использованию водорода в различных секторах экономики, например, в перспективной технологии прямого восстановления железа водородом в составе электрометаллургического комплекса по производству феррохрома нержавеющей стали на базе месторождения хромсодержащей руды «Сопчеозерское» (Мурманская обл., Кольский регион).

В структуру Центра наряду с электролизным комплексом войдут блоки обращения с водородом (компримирование, ожижение, ёмкости хранения, газопроводная сеть), потребители.

Атомно-водородные кластеры. Интеграцию водородной энергетики в экономику и энергетику страны ещё предстоит проанализировать. Но предварительные оценки показывают, что водородная энергетика, как и электроэнергетика или газовая промышленность, будет сочетать централизованное крупномасштабное производство и структуру магистрального распределения с локальным малотоннажным производством и доставкой водорода индивидуальным потребителям. Централизованное

производство наряду с обеспечением внутреннего рынка будет нацелено на экспортные поставки водорода.

При определении площадок для размещения АЭС необходимо учитывать расположение относительно магистрального газопровода, возможности создания вблизи площадки энерготехнологических станций крупномасштабных подземных хранилищ водорода или метано-водородных смесей, возможности утилизации CO_2 и привязки к одной из действующей АЭС. С этой точки зрения рассматриваются западный и восточный атомно-водородные кластеры.

Для западного атомно-водородного кластера перспективны площадки Ленинградской и Смоленской АЭС. ЛАЭС расположена близко к северному магистральному газопроводу, рассчитанному на транспортировку 55 млрд м^3 газа в год, при работе на проектной мощности он может ежегодно поставлять до 1 млн т водорода при его 20%-ном содержании в метано-водородной смеси. Для производства такого количества водорода установленная мощность АЭС должна составлять ~2000 МВт (т).

Вблизи Смоленской АЭС проходит газопровод «Ямал–Европа» производительностью 34,7 млрд м^3 в год. В этом регионе расположены соляные бассейны, которые можно использовать для сооружения подземных хранилищ природного газа, метано-водородной смеси и водорода, а также для утилизации CO_2 . Транспортировку метано-водородной смеси можно осуществлять по газопроводу без существенного изменения его технической структуры. Для производства водорода в этом кластере потребуется построить АЭС мощностью ~1600 МВт (т).

На начальном этапе развития проекта до 2030 г. производство водорода объёмом до 0,1 млн т можно обеспечить электролизом воды с использованием мощностей действующих и строящихся энергоблоков на площадках Ленинградской и Смоленской АЭС.

Рост экономик стран Азиатско-Тихоокеанского региона (АТР) требует адекватного энергетического обеспечения этих стран. Удовлетворение растущего спроса с использованием традиционных углеродных ресурсов уже сейчас сталкивается с негативным влиянием на климат. Ведущие страны региона рассматривают развитие атомной энергетики как значимый элемент обеспечения энергетической и экологической безопасности. Россия может предложить своё участие в решении этой задачи путём создания на территории

Дальнего Востока международного атомного энерготехнологического кластера, миссией которого будет промышленная демонстрация технологической возможности использования крупномасштабной ядерной энергетики, не имеющей топливных ресурсных ограничений, для долгосрочного обеспечения стран АТР экологически чистой электроэнергией и водородом. В состав кластера войдёт АЭС для экологически чистого производства водорода из воды и природного газа.

Водород и его переделы будут поставляться на зарубежный рынок по трубопроводам или танкерами. Проект крупномасштабного экологически чистого производства водорода из природного газа представляет интерес для зарубежных партнёров и может разрабатываться как совместный проект.

Сооружение на Дальнем Востоке атомных энерготехнологических комплексов, основанных на новейших российских технологиях, создаст условия для развития энергоёмкой промышленности, будет стимулировать приток высококвалифицированных специалистов, привлечёт внешних и внутренних инвесторов, откроет новые возможности для зарубежного бизнеса.

Работы по созданию атомно-водородных кластеров должны включать несколько сопутствующих пилотных проектов:

обоснование транспортировки метано-водородных смесей по существующим магистральным и региональным газопроводам;

разработка мембранных технологий и установок для выделения из смеси водорода для локальных потребителей;

разработка модулей хранения смеси и водорода в соляных подземных хранилищах, утилизация и хранение CO_2 .

Эти проекты, помимо коммерческой составляющей поставок водорода с высокой добавочной стоимостью, обеспечат технологическое лидерство нашей страны на глобальном рынке экологически чистого водорода и технологий водородной энергетики.

Безопасность водородной энергетики

Многолетнее использование водорода в энергетике и промышленности продемонстрировало степень его опасности. Поэтому были разработаны правила обращения с водородом и требования, которые нужно соблюдать, чтобы избежать аварийных ситуаций. В программе по разработке технологий атомно-водородной энергетики системный анализ её функционирования и

безопасности рассматривается как ключевой раздел, в котором предусмотрено проведение следующих работ:

- анализ, разработка и адаптация физико-математических моделей для задач безопасности водородной энергетики;
- численное моделирование и экспериментальное исследование поведения газообразных водородно-воздушных смесей в системах производства и потребления водорода;
- разработка концепции и инженерных методик для риск-информированного управления стойкостью и безопасностью водородной энергетики;
- анализ и совершенствование действующей нормативной документации для безопасности АЭС и инфраструктуры водородной энергетики.

В программе особое внимание уделено обоснованию безопасности атомно-водородных комплексов для производства водорода, в которых сочетаются ядерно-опасные объекты с водородными агрегатами.

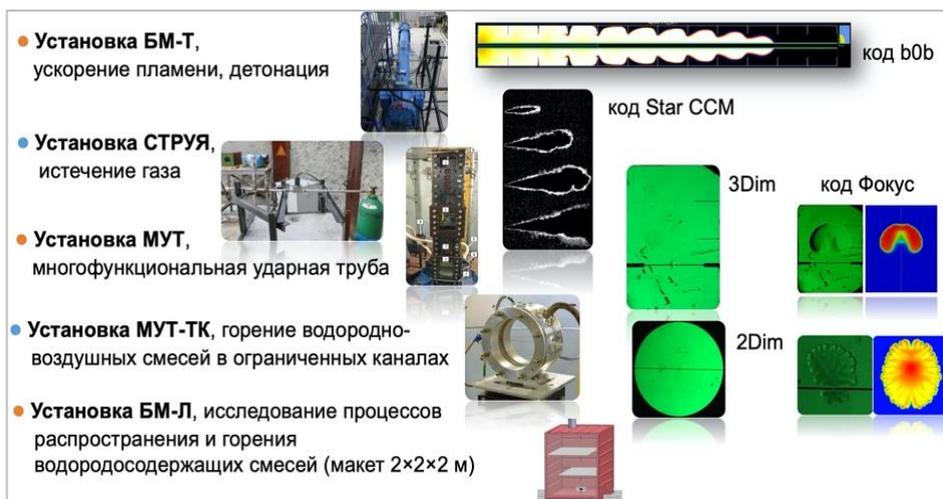


Рис. 7. Установки, созданные во ВНИИТФ им. ак. Е.А. Забабахина, для исследований по водородной безопасности

Для иллюстрации развивающихся исследований по водородной безопасности на рис. 7 показан ряд стендов, созданных во ВНИИТФ им. ак. Е.А. Забабахина, результаты экспериментальных исследований и численного моделирования поведения водородно-воздушных смесей в системах

производства и потребления водорода, выполненных совместно с НИЦ «Курчатовский институт», Институтом проблем безопасного развития атомной энергетики РАН и ООО «Кинтех Лаб».

Интеграция в экономику страны и на международные рынки.

Развитие атомно-водородной энергетики возможно лишь при качественной интеграции в экономику страны. Технологии атомно-водородной энергетики, водород и его переделы должны войти в различные области традиционных секторов энергетики, промышленности, транспорта, коммунального хозяйства и экономики. Эта работа требует кооперации, партнёрства с различными структурами как в нашей стране, так и за рубежом. Необходим диалог и сотрудничество с такими корпорациями, как «Газпром», «Роснефть», компаниями химической промышленности и металлургии. И, безусловно, нужны государственная поддержка этого направления, стимулирование различными льготами, подготовка кадров.

В ближайшую пятилетку необходимо обеспечить проведение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по производству водорода, созданию инфраструктуры обращения с ним, включая хранение, транспортировку и потребление, безопасности обращения с водородом на всех этапах жизненного цикла и во всех сферах его производства и потребления. Необходимо разработать проектную документацию с испытанием опытно-промышленных модулей основных компонентов производства и потребления водорода.

На этом этапе будут реализовываться пилотные проекты. Среди них – Центр компетенций по атомно-водородной энергетике на Кольской АЭС, который нацелен на отработку технологий повышения эффективности использования установленной мощности АЭС в маневренных режимах путём электролизного производства водорода, его использования в присоединённых высокотехнологичных производствах и для коммерческих поставок. Как одно из направлений, связанных с применением водорода в различных секторах экономики, рассматривается предложение по технологии прямого восстановления железа водородом.

Планируется запуск на Сахалине поезда на водородных элементах. Не ограничиваясь производством водорода для заправки поезда, прорабатывается последующее применение водорода в других сферах (автомобильный

транспорт, бункеровка судов, сфера ЖКХ), а также его поставка на экспорт. Для этого пилотного проекта выбран Сахалин как обладающий ресурсами модельного построения водородной экономики в региональном масштабе и находящийся в выгодном географическом положении по отношению к странам Азиатско-Тихоокеанского региона – потенциальным мощным потребителям нового ресурса.

Следующий этап с ориентиром на 2030 г. – сооружение головного блока атомной энерготехнологической станции для крупномасштабного производства экологически чистого водорода, сопровождаемое работами по созданию ключевых элементов инфраструктуры: утилизация CO₂, хранение и транспорт водорода.

Перспектива после 2030 г. – крупномасштабная атомно-водородная энергетика: создание серийной АЭС для централизованного крупномасштабного производства водорода в сочетании с локальными центрами электролизного и электрохимического производства водорода, в том числе на АЭС, с соответствующей инфраструктурой для поставки водорода на внутренний и внешний рынок. В начале этого этапа основными драйверами внедрения атомно-водородной энергетике станут западный и восточный атомные энерготехнологические кластеры, нацеленные на крупномасштабный экологически чистый передел природного газа в водород с использованием энергии высокотемпературных гелиевых реакторов.

Поставки водорода в Европу могут быть реализованы с учётом действующей газопроводной структуры, а в страны Азиатско-Тихоокеанского региона – танкерами в криогенном или химически связанном виде.

При интеграции водорода в экономику страны и мира учитывается постулат: сколько бы ни было произведено экономически приемлемого водорода, он будет востребован и использован.

Литература

1. Цибульский В.Ф., Пономарёв-Степной Н.Н. Проблемы мировой энергетики начала века. – М.: Энергоатомиздат, 2008.
2. Кухаркин Н.Е., Пономарёв-Степной Н.Н., Усов В.А. Космическая ядерная энергетика (ядерные реакторы с термоэлектрическим и термоэмиссионным преобразованием – «Ромашка» и «Енисей»). – М.: ИздАт, 2012.
3. Ponomarev-Stepnoy N., Talyzin V., Usov V. Russian Space Nuclear Power Systems and Nuclear Thermal Propulsion Units // Nuclear News. December 2000. P. 33–46.

4. Александров А.П. Атомно-водородная энергетика и технология. – М.: Атомиздат, 1978, вып. 1. С. 5–7.
5. Александров А.П., Легасов В.А., Сидоренко В.А. и др. Структура атомной энергетики с учётом производства энергии помимо электричества // Атомная энергия. 1977, вып. 6. С. 427–431.
6. Александров А.П., Пономарёв-Степной Н.Н. Перспективы развития атомной энергетике // Атомно-водородная энергетика и технология. – М.: Атомиздат, 1978, вып. 1.
7. Александров А.П., Пономарёв-Степной Н.Н. Атомная энергетика и технический прогресс // Атомной энергетике 20 лет. – М.: Атомиздат, 1974.
8. Пономарёв-Степной Н.Н., Столяревский А.Я, Пахомов В.П. Атомно-водородная энергетика. – М.: Энергоатомиздат, 2008.
9. Алексеев П.Н., Алексеев С.В., Андрианова Е.А. и др. Двухкомпонентная ядерная энергетическая система с тепловыми и быстрыми реакторами в замкнутом ядерном топливном цикле / Под ред. Н.Н. Пономарёва-Степного. – М.: Техносфера, 2016.
10. Атомно-водородная энергетика и технология. – М.: Энергоатомиздат, 1979–1988, вып. 1–8.
11. Australia's National Hydrogen Strategy. COAG Energy Council Hydrogen Working Group. Commonwealth of Australia. November 2019. <https://www.industry.gov.au/sites/default/files/2019-11/australias-national-hydrogen-strategy.pdf>.
12. Korea Hydrogen Economy Roadmap 2040. IEA/IRENA Renewables Policies Database. <https://www.rvo.nl/sites/default/files/2019/03/Hydrogen-economy-plan-in-Korea.pdf>.
13. Stratégie Nationale Bas-Carbone, Suivre le ministère de la Transition écologique. France. <https://www.ecologie.gouv.fr/strategie-nationale-bas-carbone-snbc>.
14. The U.S. Department of Energy Hydrogen Program Plan. DOE/EE-2188. November 2020.
15. Unlocking our energy productivity and renewable potential. New Zealand energy efficiency and conservation strategy 2017–2022. <https://www.mbie.govt.nz/assets/346278aab2/nzeecs-2017-2022.pdf>.
16. A Hydrogen Strategy for a climate neutral Europe. 8 July 2020, Brussels https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/FS_20_1296.
17. The Future of Hydrogen (Seizing today's opportunities) Report prepared by the IEA for the G20. Japan, Typeset in France by IEA. June 2019. <https://www.enerjiportali.com/wp-content/uploads/2019/07/The-Future-of-Hydrogen.pdf>.
18. Hydrogen scaling up (A sustainable pathway for the global energy transition) Hydrogen Council. November 2017. <https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2017/11/Hydrogen-scaling-up-Hydrogen-Council.pdf>.

19. Большаков К.Г., Кондратьев Д.Г., Матренин В.И. и др. Срок службы щелочных матричных топливных элементов // Электрохимическая энергетика. 2015. № 4. С. 175–179.
20. Животов В.К., Потапкин Б.В., Русанов В.Д. Плазменный катализ – явление и приложения // Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Серия Б. Химия низкотемпературной плазмы. – М.: Янус-К, 2005. С. 4–36.
21. Русанов В.Д., Этеван К., Бабарицкий А.И. и др. Эффект плазменного катализа на примере диссоциации метана на водород и углерод // Доклады РАН, 1997, №2. С. 1–3.
22. Потехин С.В., Потапкин Б.В., Деминский М.А. и др. Эффект плазменного катализа при разложении метана // Химия высоких энергий, 1999, №1. С. 59–66.
23. Гребенник В.Н., Кухаркин Н.Е., Пономарёв-Степной Н.Н. ВТГР – инновационное направление развития атомной энергетики. – М.: Энергоатомиздат, 2008.
24. Петрунин В.В., Кодочигов Н.Г., Дмитриев С.М. и др. Ядерные энергетические установки с высокотемпературными модульными газоохлаждаемыми реакторами. В 2-х томах / Под общей ред. Н.Н. Пономарева-Степного. – Нижний Новгород: Нижегородский ГТУ им. Р.Е. Алексеева, ОАО «ОКБМ Африкантов», 2018.
25. Глушков Е.С., Компаниец Г.В., Пономарёв-Степной Н.Н., Фомиченко П.А. Физика высокотемпературных реакторов. – М.: Энергоатомиздат, 2008.
26. Пономарёв-Степной Н.Н., Алексеев С.В., Петрунин В.В. и др. Атомный энерготехнологический комплекс с высокотемпературными газоохлаждаемыми реакторами для масштабного экологически чистого производства водорода из воды и природного газа // Газовая промышленность, 2018, № 11. С. 94–102.

А.А. Саркисов¹

НЕКОТОРЫЕ ИСТОРИЧЕСКИЕ УРОКИ СОЗДАНИЯ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ КОРАБЕЛЬНОЙ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Крупнейшей вехой в 75-летней истории атомной отрасли стало создание ядерной энергетической установки для первой в СССР атомной подводной лодки. В настоящем разделе основной акцент сделан на роли науки в решении этой новой для того времени, сложной и многоплановой проблемы. Подчёркивается, что связь Академии наук с ВМФ всегда обеспечивала эффективное решение задач по развитию всех сил и средств ВМФ и наиболее интенсивно – подводного флота. Тесное взаимодействие науки с флотом в полной мере проявилось в эпоху научно-технической революции, бурное развитие которой пришлось на годы конфронтации между двумя противостоящими военно-политическими блоками, возглавляемыми СССР и США.

Использование ядерных источников энергии на флоте, прежде всего подводном, позволило решить задачу, связанную с созданием двигателя, способного обеспечить кораблю принципиально новые качества. Время показало, что в сочетании с новыми видами вооружения ядерная энергетика коренным образом изменила стратегические, тактические и технические возможности подводного флота и его роль в Мировом океане, что привело к существенной корректировке военных доктрин ведущих стран.

Как и в разработке ядерного оружия, в создании атомных подводных лодок (АПЛ) нашей стране пришлось догонять США, которые опережали СССР на 4–5 лет благодаря строительству и вводу в строй своей первой АПЛ «Наутилус». Догонять пришлось самостоятельно, решая, при отсутствии аналогов, множество сложных научно-инженерных проблем.

Стартовым документом, положившим начало активных работ по созданию первой отечественной АПЛ, стало историческое постановление Совета министров СССР от 9 сентября 1952 г. Следует пояснить одну парадоксальную особенность этого постановления: в нём не были обозначены интересы ВМФ и участие флота в работах. Одна из причин такого необычного решения –

¹ Советник РАН, вице-адмирал, академик РАН.

весьма сдержанное отношение к созданию АПЛ главнокомандующего ВМФ адмирала флота Советского Союза Н.Г. Кузнецова. Министр среднего машиностроения В.А. Малышев опасался, что консерватизм взглядов высшего командования ВМФ, проявившийся при рассмотрении предложений о начале работ по ядерной энергетической установке и АПЛ, сильно затруднит их разработку.

История создания отечественного атомного подводного флота достаточно подробно описана во многих изданиях. Поэтому основное содержание будет сосредоточено на роли науки в решении такой новой для того времени, сложной и многоплановой проблемы, какой была проблема создания атомной подводной лодки.

Традиция тесного творческого сотрудничества выдающихся отечественных учёных с флотом соблюдалась на протяжении всей истории его развития [1, 2]. Первое, что следует отметить: создание отечественного атомного подводного флота стало возможным лишь благодаря достигнутому в СССР высокому потенциалу фундаментальной науки. Это потребовало концентрации новейших научных достижений в различных областях знаний, а также производственных и людских ресурсов. Этому способствовали, прежде всего, открытия в ядерной физике, которые послужили базой для создания корабельной ядерной энергетике, коренным образом изменившей облик подводного флота и повысившей его боевые возможности [3]. Решающую роль также сыграла передовая отечественная школа ядерной физики, сосредоточенная в ряде институтов АН СССР, и прежде всего в ленинградском Физико-техническом институте.

Особо необходимо подчеркнуть, что корабельная ядерная энергетика, как и атомная подводная лодка в целом, – это наше национальное достижение. Если при создании атомного оружия разработчики имели возможность в какой-то мере опираться на материалы, предоставленные разведчиками, то при создании корабельных ядерных энергетических установок они действовали автономно.

Это нашло отражение во многих, в том числе принципиальных, отличиях по ряду принятых конструктивных решений [4]. Например, подавляющее число АПЛ США построены по однокорпусной схеме, их энергетические установки, как правило, однореакторные и одновальные, а подавляющее количество наших АПЛ – двухкорпусные, двухреакторные и двухвальные. По-

видимому, американские конструкторы были более уверены в надёжности выбранных ими материалов, оборудования и конструкций, преследуя как приоритетную цель достижение лучших виброакустических характеристик и более высокой скрытности АПЛ.

Многие решения, положенные в основу создания первой атомной подводной лодки, с позиции сегодняшнего дня представляются тривиальными. Однако в то время, когда они принимались, разработчики сталкивались с серьёзными трудностями из-за недостаточности научной базы и дефицита информации.

На самом ответственном начальном этапе общее руководство работами по созданию АПЛ осуществлял заместитель председателя Совета министров СССР и одновременно министр судостроительной промышленности, а с августа 1953 г. – министр среднего машиностроения В.А. Малышев. Именно он на заседании секции № 8 Научно-технического совета Первого главного управления (НТС ПГУ) при Совете министров СССР поручил решение этой задачи академиком АН СССР А.П. Александрову и Н.А. Доллежалю, а также члену-корреспонденту АН СССР Д.И. Блохинцеву.

Уже первый шаг – выбор типа реактора для подводной лодки – оказался далеко не простым делом. Он усложнялся жёсткими весогабаритными ограничениями и специфическими условиями размещения ядерной энергетической установки на плавучей платформе. В частности, на начальной стадии работ всех беспокоило незнание того, как поведёт себя заполненная жидкостью активная зона в условиях качки, кренов и дифферентов. Ведь неизбежно возникающие при этом динамические реакции и инерционные эффекты могли нарушить не только плавный ход теплоносителя, но и нейтронный баланс активной зоны. Правда, после проведённого анализа и выполненных расчётов стало ясно, что опасения по этому поводу преувеличены. Силы инерции, возникавшие в условиях качки, столь малы по сравнению с общей массой покоя, что не было оснований их опасаться.

Через месяц после заседания секции № 8 НТС ПГУ А.П. Александров и его коллеги окончательно пришли к выводу, что реактор должен иметь водяной замедлитель, тепловой спектр нейтронов, а в качестве теплоносителя следует использовать ту же лёгкую воду под таким давлением, при котором будет обеспечен необходимый запас до кипения. Здесь уместно заметить, что до этого в нашей стране не было построено ни одного энергетического реактора

такого типа. Так что предстоящая работа по созданию реактора с водой под давлением для первой атомной подводной лодки носила поистине пионерский характер.

Но это был не единственный вариант. Второй из предложенных проектов – реактор с жидкометаллическим теплоносителем. Его активно поддерживал Д.И. Блохинцев, в то время директор лаборатории «В», на базе которой вскоре был создан Физико-энергетический институт в г. Обнинске. Позже эту идею реализовали под научным руководством академика АН УССР А.И. Лейпунского в небольшой по количеству, но уникальной, единственной в мире серии атомных подводных лодок с реакторами на промежуточных нейтронах, охлаждаемых свинцово-висмутовым теплоносителем.

Что касается ядерной энергетической установки в целом, то с самого начала разработчики остановились на традиционной котлотурбинной схеме с получением пара в парогенераторе, нагреваемом водой первого контура.

При внешней схожести традиционных паросиловых и корабельных атомных энергетических установок (в обоих случаях есть источник тепла, парогенератор, насосы, сепараторы, конденсаторы, паровая турбина и т.д.) существует принципиальное различие в природе самого источника тепла. Применение ядерного реактора в качестве источника тепловой энергии потребовало изучения новых закономерностей теплообмена и гидродинамики.

Несмотря на то что вода как теплоноситель использовалась в котельной технике давно, в атомной энергетике возникла необходимость обеспечить новые технологические требования и выявить новые закономерности при использовании воды в полях мощных излучений, при ранее не применявшихся материалах оболочек для форсированных тепловых потоков и новых формах проточного тракта. В проблеме теплопередачи от ТВЭЛов к теплоносителю потребовалось развить исследования по кризисам теплоотдачи в целевых каналах сложной формы, определению коэффициентов теплоотдачи для новых геометрий и совокупности параметров, созданию и изучению роли различных интенсификаторов теплообмена.

В гидродинамике стали совершенно недостаточны одномерные и осреднённые подходы, когда для теплообменного аппарата определяются только перепады статического давления на участках проточного тракта и средние в сечениях скорости, то есть расходы. При этом возникла необходимость в разработке новых методов экспериментального

исследования актуальных скоростей с выделением пульсационных составляющих, выявления источников и спектров пульсаций и вихревых структур, а также оптимизации в решении вопросов моделирования пульсационных течений, разработке численных методов расчёта трёхмерных течений, решений уравнений Рейнольдса и Навье-Стокса. Актуальным оказался и вопрос формирования безвихревого проточного тракта с обязательным выравниванием поля давлений в напорных и выходных коллекторах.

Все эти сложные научные задачи были успешно решены в течение 10–12 лет творческими коллективами Физико-энергетического института, Центрального котлотурбинного института, Научно-исследовательского и конструкторского института энерготехники и других научных учреждений [2]. Нет возможности назвать всех специалистов, которые внесли вклад в исследование перечисленных проблем. Но в этом ряду особо следует отметить исключительную роль, которую сыграли работы членов Академии наук – академиков И.И. Новикова [5] и С.С. Кутателадзе [6].

Кстати, достаточно неожиданно конструкторы столкнулись с большими трудностями в решении проблемы надёжной работы парогенераторов. Важность этого элемента энергетической установки, как связующего звена между первым радиоактивным и вторым контурами, с самого начала была очевидной. В случае нарушения герметичности трубной системы парогенератора более высокое давление в первом контуре создавало риск попадания воды в другие помещения подводной лодки и море. Поэтому к парогенератору предъявлялись высочайшие требования. Особенно важным оказался выбор материалов для труб парогенераторов. Конструкторское бюро Балтийского завода использовало различные сплавы, но положительного результата долго не удавалось получить. В конце концов проблему решили. Основной вклад в общий успех внёс начальник специального КБ котлостроения Балтийского завода Г.А. Гасанов.

Масштабные научно-исследовательские работы были развёрнуты с целью повышения скорости хода подводных лодок и обеспечения их скрытности. По первой проблеме они шли в ряде ведущих научных учреждений Академии наук гидродинамического профиля, но особенно активно – в Институте гидродинамики СО АН СССР под руководством академика М.А. Лаврентьева.

Исследования нацеливались, прежде всего, на изучение пограничного

слоя. В результате были разработаны методы оптимизации геометрических форм обтекаемого тела, а также принципы непосредственного воздействия на пограничный слой с целью снижения сопротивления движению. Многие из этих исследований носили новаторский характер, а ряд практических разработок не имел аналогов в мировой практике [7].

Создание атомного флота потребовало выдвинуть в качестве первоочередной задачи обеспечение скрытности подводных лодок. Здесь необходимо отметить, что АПЛ первых поколений по многим определяющим тактико-техническим параметрам, таким как скорость хода, глубина погружения, состав и характеристики вооружения, живучесть, вполне отвечали требованиям своего времени.

Однако, к сожалению, подводные лодки обладали высоким уровнем шумности, что снижало их скрытность. В этой связи задача улучшения акустических характеристик отечественных АПЛ приобрела особую значимость.

В ряду чрезвычайно сложных оказалась и проблема обеспечения скрытности подводных лодок и поиска эффективных средств их обнаружения, для решения которой необходимо было осуществить широкую программу фундаментальных и прикладных исследований.

Из новых направлений в рамках этой программы можно отметить: исследования процессов, возникавших при прохождении подводных лодок на поверхности, в приповерхностном слое и в толще океана, которые могут обнаруживаться средствами противолодочной обороны; разработку новых физических принципов создания корабельных, авиационных и космических систем обнаружения атомных подводных лодок по их кильватерному следу, а также по измерению параметров других сопутствующих физических полей.

Конечным результатом этих масштабных исследований стала разработка практических методов снижения шумности отечественных АПЛ и создание приборов и систем обнаружения подводных лодок вероятного противника. Достигнутый в этих областях прогресс можно проиллюстрировать двумя цифрами. За 30 лет – с 1970 по 2000 г. – подводную шумность лодок удалось снизить в среднем в 1,5 раза, а звуковое давление – более чем в 4 раза [8].

Первостепенное значение для Военно-морского флота всегда имели проблемы связи. Их актуальность особенно возросла с появлением атомных подводных лодок с баллистическими ядерными ракетами и необходимостью

достижения ими максимальной скрытности, что нельзя обеспечить при вынужденном их подвсплытии на сеансы связи с командным пунктом. Использование буксируемых антенн, выпускаемых на поверхность во время сеансов связи, также не приводило к нужному результату, так как их можно было обнаружить техническими средствами противолодочных поисковых сил.

Для решения этой задачи была инициирована масштабная программа фундаментальных и прикладных исследований, научное руководство которыми возглавил крупнейший специалист в области радиотехники академик В.А. Котельников. Из наиболее важных исследований, выполненных в рамках этой программы, можно назвать, например, работы по созданию каналов связи в диапазоне сверхнизких частот, а также в диапазонах сейсмических и гидроакустических волн. Работы в области оптического (лазерного) излучения и создание лазерных линий связи открыли возможность обеспечения связи с подводными лодками, находящимися практически во всех районах Мирового океана [9].

Надо отметить, что решения возникавших в ходе строительства подводных лодок проблем стимулировали развитие самих фундаментальных наук. Так, исследования в области гидроакустики внесли серьёзный вклад в физику океана и значительно расширили наши представления о распространении звуковых волн в реальной водной среде. Сегодня этими вопросами занимаются большие группы учёных, в том числе коллектив специально созданного с этой целью Акустического института им. Н.Н. Андреева РАН.

Выдающимся научным достижением фундаментального характера стало открытие в 1946 г. сверхдальнего распространения звукового канала, сделанное академиком АН СССР Л.М. Бреховских, д.т.н. профессором Л.Д. Розенбергом, контр-адмиралом-инженером Б.И. Карловым и д.т.н. профессором Н.И. Сигачёвым в ходе организованной Военно-морским флотом первой гидроакустической экспедиции в Японское море. Это открытие сыграло большую роль как в обеспечении скрытности, так и в создании методов обнаружения АПЛ, а также нашло применение в решении навигационных задач и создании систем подводной связи [10].

Другой пример возникновения нового научного направления, стимулированного интересами совершенствования флота, связан с гравиметрией. Мощным толчком для её развития стали выдвинутые флотом повышенные требования к точности определения места старта и стартовой

вертикали при пуске баллистических ракет с подводных лодок. Это, в свою очередь, потребовало детального изучения аномалий гравитационного поля Земли в Мировом океане, что оказалось очень сложной научной задачей и определило развитие специальных теоретических подходов, а также соответствующей экспериментальной техники. Исследования аномалий гравитационного поля Земли в Мировом океане относятся, по существу, к новым научным направлениям в гравиметрии [11].

Приведу ещё один пример. Плавание атомных подводных лодок в северных широтах выдвинуло задачу организации комплекса исследований по изучению арктических льдов – их толщины, в том числе аномальных отклонений от средних значений, структуры внутренней поверхности ледовых покрытий, механической прочности льдов, закономерностей расположения трещин и развоидий и многих других свойств. Столь углублённое изучение арктических льдов выходило далеко за рамки обычных потребностей народного хозяйства и стимулировалось интересами повышения эффективности боевого применения подводных лодок в различных районах Арктического бассейна.

В тех же интересах были развёрнуты широкомасштабные исследования рельефа дна морей Арктического бассейна. Разработанный для решения данной задачи геофизический измерительный комплекс включал сейсмолокацию, эхолотирование и геомагнитные методы. В итоге удалось получить детальные карты рельефа дна Арктического бассейна. Результаты оказались настолько эффективными, что создалась довольно парадоксальная ситуация: рельеф дна Арктического бассейна сегодня изучен детальнее, чем рельеф дна других океанов [12].

Говоря о роли Академии наук в создании отечественного атомного подводного флота, следует отметить исключительно большую роль академических научных советов, как основных координирующих звеньев в обеспечении взаимодействия фундаментальной и прикладной науки, эффективного использования научных достижений в строительстве подводных лодок, при создании для них новых образцов ВВСТ.

Особое значение имела деятельность Научного совета по комплексной проблеме «Гидрофизика», созданного в 1967 г., первым председателем которого был вице-президент АН СССР академик Б.П. Константинов, с 1970 г. его председателем был президент АН СССР академик А.П. Александров,

с 1988 г. его возглавлял академик А.В. Гапонов-Грехов. С 2017 г. советом руководит вице-президент РАН академик В.Г. Бондур. Совет всегда занимался широким кругом вопросов, но в течение многих лет центральной оставалась проблема обеспечения скрытности наших лодок и разработки средств обнаружения подводных лодок вероятного противника. Научный совет по гидрофизике в высшей степени эффективно осуществлял и осуществляет координацию всех отечественных работ в этой области.

Решением многих актуальных проблем в интересах ВМФ занимался и Научный совет по проблемам гидродинамики, созданный в 1960 г. Первым его председателем стал академик М.А. Лаврентьев.

В конце 1970-х годов был образован Научный совет по проблемам связи с глубоководными подводными лодками, находящимися на боевой службе в районах боевого патрулирования, в организации которого, как и в его дальнейшей работе, большую роль сыграл председатель совета вице-президент АН СССР академик В.А. Котельников.

Проблемами применения вычислительной техники и использования математических методов, в том числе в интересах Военно-морского флота, занимался Научный совет по прикладным проблемам при Президиуме Академии наук СССР, образованный в 1967 г. Его первым председателем стал известный специалист в области математики и кибернетики академик В.М. Глушков.

Военно-морской флот на протяжении всей истории своего развития был, да и сегодня остаётся наиболее наукоёмким видом Вооружённых сил. Поэтому неудивительно, что первая структура оборонного назначения в рамках Академии наук – созданная в 1964 г. Морская физическая секция, позже преобразованная в Секцию прикладных проблем Министерства обороны при Президиуме АН СССР, – имела военно-морскую направленность. Укомплектованная высокопрофессиональными офицерами-специалистами, относительно компактная по численности, секция зарекомендовала себя как эффективный инструмент стимулирования актуальных для флота фундаментальных исследований и внедрения их результатов в военное кораблестроение, в частности, в решение проблем атомного подводного кораблестроения.

Первая отечественная АПЛ «Ленинский комсомол» (рис. 1), получившая тактический номер К-3, была спущена на воду в августе 1957 г., через 4,5 года

после создания первой американской АПЛ «Наутилус». Её опытная эксплуатация продолжалась до конца 1959 г. За это время было совершено три выхода в море, мощность установки поднималась до 80% от номинальной, проверялись и отработывались различные режимы эксплуатации. После завершения опытной эксплуатации К-3 начали использовать и для выполнения специальных заданий командования, и для несения службы на просторах Мирового океана – нового вида боевой деятельности ВМФ. В 1962 г. она совершила первый в истории отечественного подводного флота поход к Северному полюсу, пройдя подо льдами Арктики 1294 мили. До вывода из боевого состава ВМФ она прослужила без малого 30 лет, пройдя со времени окончания испытаний ядерной энергетической установки (ЯЭУ) в 1958 г. 128 443 мили.



Рис. 1. Первая отечественная АПЛ «Ленинский комсомол»

Спуск на воду первой АПЛ послужил началом широкомасштабного строительства отечественного атомного, прежде всего подводного, флота. Из приведённых в таблице 1 сравнительных данных по количеству построенных в мире кораблей и судов с ЯЭУ [4] следует, что за период освоения и использования корабельной ядерной энергетики с середины 50-х годов XX в. ведущие государства мира создали к 2020 г. более 560 кораблей и судов с ЯЭУ. При этом в нашей стране (Россия, СССР) – 250 АПЛ и 5 надводных кораблей с ЯЭУ, на которых эксплуатировалось более 450 ядерных реакторов, в том

числе 9 с жидкометаллическим теплоносителем. Кроме этого, построено 11 судов ледового класса с ЯЭУ для единственного в мире отечественного атомного ледокольного флота.

К 2020 г. в состав ВМС США, Великобритании, Франции, Китая и Индии было принято более 290 кораблей с ЯЭУ.

Около 93% построенных кораблей – это ракетные и многоцелевые подводные лодки, половина из них создана в СССР–России.

Таблица 1

Суммарное количество построенных кораблей и судов с ЯЭУ
(на начало 2020 г.)

Государство	Корабли и суда с ЯЭУ			В эксплуатации (подводные лодки + надводные корабли)
	Подводные лодки	Надводные корабли + суда	Всего построено	
США	209	21+1 (Savanah)	231	67+10
Россия (СССР)	250	5+10 (АЛ)	265	41+2
Великобритания	30		30	10
Франция	16	1	17	10+1
Китай	15		15	12
Индия	1		1	1
Германия		0+1 (Otto Hahn)	1	
Япония		0+1 (Mutzu)	1	
Итого	521	27+13	561	141+13

На рис. 2 показана широта спектра применения атомных энергетических установок на военных и коммерческих объектах отечественного флота. Здесь представлены фотографии подводных лодок четвёртого поколения, первый в мире атомный ледокол «Ленин», новейший атомный ледокол «Арктика», атомный лихтеровоз и крейсер «Пётр Великий» с атомной установкой.

Однако этим не исчерпывается всё многообразие, хотя и не всегда оправданное, построенных атомных кораблей и судов различного назначения. Некоторые из проектов положили начало строительству серийного ряда, другие носили прорывной характер.

Но были и неудачные проекты, строительство которых ограничилось головными образцами. Примером может служить по-своему оригинальный проект подводной лодки 651Э со вспомогательной атомной установкой

ВАУ-6 (рис. 3, 4). Энергетическая установка этой подводной лодки состояла из двух дизелей мощностью 4000 л.с. каждый, двух главных гребных электродвигателей мощностью по 5500 л.с., двух гребных электродвигателей экономического хода мощностью по 200 л.с. (на линии вала), вспомогательной атомной турбогенераторной установки мощностью 600 кВт с одним ядерным реактором кипящего типа и турбогенератором переменного тока.



Рис. 2. Некоторые проекты АПЛ, НК с ЯЭУ и атомных ледоколов

В апреле 1971 г. в Научно-исследовательском технологическом институте (г. Сосновый Бор Ленинградской обл.) был смонтирован наземный стенд-прототип корабельной ЯЭУ для проверки и отработки вспомогательной атомной установки (ВАУ). ВАУ разместили в отдельном отсеке-контейнере, корпус которого равнопрочен с корпусом подводной лодки. Вспомогательная атомная установка обеспечивала подводной лодке экономическую подводную скорость в 4 узла и дальность плавания под водой до 7000 миль. Испытания АПЛ позволили проверить возможность и целесообразность применения энергетических установок типа ВАУ-6 в качестве вспомогательных источников электроэнергии дизель-электрических подводных лодок для увеличения дальности их непрерывного плавания в подводном положении.

Несмотря на успешное решение стоявших в ходе реализации этого проекта научных и инженерно-технических задач, в серию ядерные реакторы для дизельэлектрической подводной лодки не пошли. Углублённый анализ проектной документации и итогов проведённых испытаний позволил сделать заключение, что по совокупности технико-экономических, эксплуатационных и оперативно-тактических параметров серийное производство АПЛ данного

проекта нецелесообразно. И всё же, отдавая должное учёным, конструкторам, рабочим и техникам, принимавшим участие в реализации этого незаурядного проекта, нельзя не отметить, что данное направление создания автономных малогабаритных транспортных ЯЭУ, до сих пор не имеющих мировых аналогов, является отечественным приоритетом [13].



Рис.3. АПЛ проекта 651Э

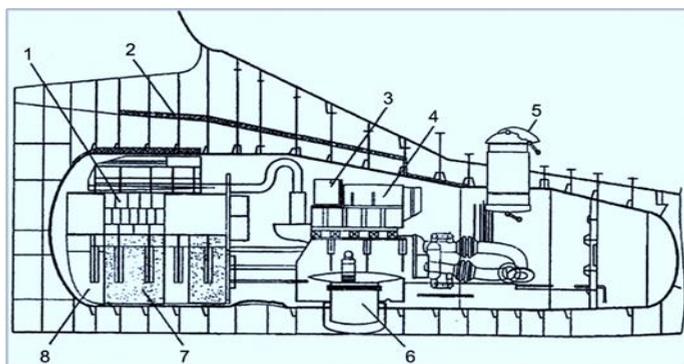


Рис. 4. Схема расположения оборудования в установке ВАУ-6

1 – реактор; 2 – свинцовая защита; 3 – турбина; 4 – генератор;
5 – входной люк; 6 – сборник конденсата; 7 – блок защитный; 8 – бак ЖВЗ

Несомненно, прорывным по многим техническим характеристикам стала АПЛ проекта 661, которая по ряду объективных обстоятельств была реализована лишь в единственном экземпляре (рис. 5). Крупнейшим технологическим достижением можно назвать применение титана для сооружения столь масштабных объектов (длина АПЛ составляла 120 м).

Строительство титановой подводной лодки потребовало решения многих научных и технологических проблем, а также глубокой реконструкции металлургической индустрии [14].



Рис. 5. АПЛ проекта 661 («Золотая рыбка»)

Реакторы, разработанные для АПЛ 661-го проекта, отличались рядом оригинальных особенностей, в частности, прокачка теплоносителя первого контура осуществлялась по схеме «труба в трубе», что обеспечивало компактность ЯЭУ при высокой тепловой напряжённости. Для питания основных потребителей электрической энергии был принят переменный трёхфазный ток напряжением 380 В и частотой 50 Гц. Существенным нововведением стал отказ от использования дизель-генераторов: в качестве аварийного источника использовалась мощная аккумуляторная батарея, состоящая из двух групп серебряно-цинковых аккумуляторов. На борту корабля был установлен всеширотный навигационный комплекс, обеспечивавший подводное и подлёдное плавание.

Строительство АПЛ продолжалось почти 10 лет. Это объяснялось задержками в поставках титана, комплектующего оборудования, длительным циклом создания ракетного комплекса, принятого на вооружение лишь в 1968 г. Как оказалось, титановый корпус требует других методик расчётов прочности, нежели стальной – не учёт этого обстоятельства привёл к срыву гидравлических испытаний некоторых блоков корабля. К тому же лодка обошлась очень дорого, за что получила прозвище «Золотая рыбка». Тем не

менее на государственных испытаниях в 1969 г. она показала скорость подводного хода в 42 узла при 80% мощности главной энергетической установки, а после передачи подводной лодки флоту при испытаниях на мерной миле в 1971 г. она достигла на полной мощности реакторов рекордной скорости 44,7 узла. Подводная лодка проекта 661 занесена в Книгу рекордов Гиннеса как самая быстрая в мире. Ни одна АПЛ в мире до сих пор не превзошла это достижение.

Подводная лодка проекта 661 по своим ходовым и манёвренным качествам не имела аналогов ни в советском, ни в зарубежных флотах и послужила несомненным предшественником АПЛ второго и третьего поколений с крылатыми ракетами на борту и титановыми корпусами. Однако задержка с её вводом в строй, ряд тактических недостатков ракетного комплекса, высокая шумность, конструктивные недоработки отдельных приборов и недостаточный ресурс основных механизмов и оборудования корабля, а также ввод в строй АПЛ второго поколения других проектов привели к отказу от её серийного строительства.

Атомная подводная лодка с крылатыми ракетами проекта 661 вошла в состав Северного флота и с января 1970 по декабрь 1971 г. находилась в опытной эксплуатации, после чего была переведена в боевой состав. Однако она совершила всего несколько боевых походов ввиду низкой надёжности механизмов и оборудования, прошла ряд длительных ремонтов. В 1988 г. её вывели в резерв, а в начале 1990-х годов списали из состава флота [15].

Своеобразной кульминацией интеграции науки и кораблестроения стало создание высокоавтоматизированных скоростных подводных лодок проекта 705 (рис. 6) с реактором на промежуточных нейтронах, охлаждаемым свинцово-висмутовым теплоносителем. Они предназначались для уничтожения подлодок противника во время их выхода из баз, на морском переходе и на позициях предполагаемого использования оружия против объектов на берегу. Субмарины могли привлекаться для уничтожения надводных кораблей и транспортов противника во всех районах Мирового океана, вплоть до Арктики [16]. Они обладали фантастическими скоростными и манёвренными характеристиками и множеством новшеств: титановый корпус, реактор на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем и полностью автоматизированное управление всеми системами корабля.

И всё же основным элементом новизны, определившим судьбу всего проекта, стал выбор главной энергетической установки корабля. Разработчики остановились на компактном атомном реакторе на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем. Это позволило сэкономить около 300 т водоизмещения за счёт большей температуры пара и, следовательно, улучшить эффективность турбины.

Первоначально предполагалось, что экипаж АПЛ будет состоять из 16 человек, но в дальнейшем, по требованию военно-морского флота, его численность была доведена до 29 человек (4 мичмана и 25 офицеров).



Рис. 6. АПЛ проекта 705

Таким образом, Советскому Союзу удалось построить единственную в мире серию подводных АПЛ проектов 705 и 705К (7 единиц) с реакторами на промежуточных нейтронах и тяжёлым свинцово-висмутовым теплоносителем. Это был своего рода научно-технический прорыв. АПЛ проекта 705 опередила своё время на несколько десятилетий. Согласно западным публикациям – на 20 лет. Более корректно говорить об опережении на 30–40 лет, потому что в мире только сейчас по-настоящему оценили потенциальные достоинства этой ядерной технологии, в ряде стран начата разработка основанных на её базе энергоисточников малой и средней мощности коммерческого и оборонного назначения, в первую очередь для регионов, не имеющих централизованного электроснабжения.

С учётом принципиальной новизны энергетической установки и впервые использованной системы комплексной автоматизации можно говорить о том,

что в основе АПЛ 705 лежали новейшие научно-технические достижения. Пожалуй, это единственный в нашей стране случай, когда научными руководителями проекта были сразу четыре академика – ведущие специалисты в своей области: академик АН СССР Анатолий Петрович Александров – научный руководитель создания АПЛ в целом, академик АН УССР Александр Ильич Лейпунский, отвечавший за ядерную энергетическую установку, академик АН СССР Владимир Александрович Трапезников, руководивший автоматизацией управления, и академик АН Армянской ССР Андроник Гевондович Иосифьян, ответственный за электрооборудование [17, 18].

Беспрецедентная концентрация на проекте выдающихся личностей и стоявших за ними научных коллективов, а также сосредоточение научно-производственного потенциала других ведущих советских институтов позволили создать установку и в целом подводную лодку, обогнавшую время.

К сожалению, во время эксплуатации подлодок проекта 705 проявились существенные недостатки, которые препятствовали их эффективному использованию.

В частности, с обеспечением базирования АПЛ обозначились серьёзные трудности из-за необходимости постоянной поддержки в горячем состоянии первого контура реактора. Следовало проводить регулярные спецоперации по предотвращению окисления теплоносителя, периодическую регенерацию и постоянный контроль за состоянием сплава.

Если бы не сложная экономическая ситуация, то недостатки свинцово-висмутового направления на подводном флоте, свойственные всякому начальному периоду новых разработок, можно было бы преодолеть, и лодки этого типа стали бы равноправной альтернативой в развитии отечественных АПЛ.

Данные по ежегодному и суммарному количеству АПЛ, вводимых в состав флотов государств, приведены на рис. 7 и 8. В 1960–1970-е годы и в первой половине 1980-х годов на воду сходило максимальное количество (до 10 и более единиц) зарубежных и отечественных АПЛ. В отдельные годы в США вводили в строй по 17 АПЛ, в нашей стране – до 10–12 АПЛ. С середины 1970-х годов и до 2005 г. Россия (СССР) держала первенство по построенным атомным подводным лодкам.

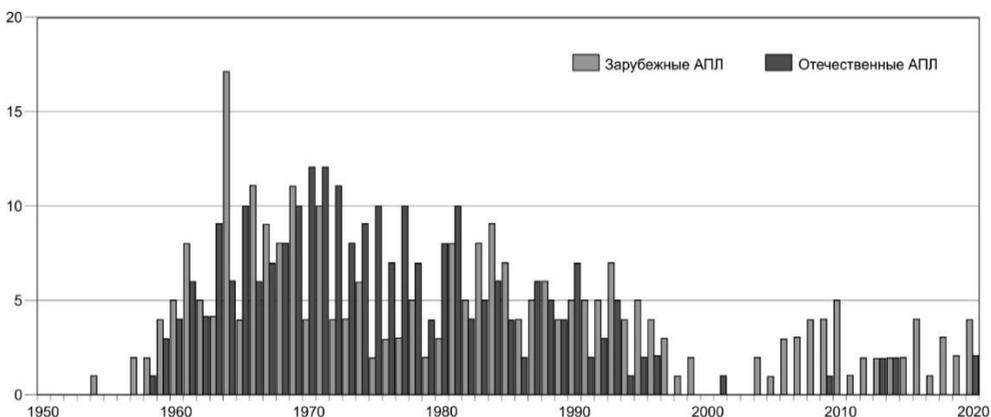


Рис. 7. Ежегодное количество зарубежных и отечественных АПЛ, вводимых в состав флотов государств

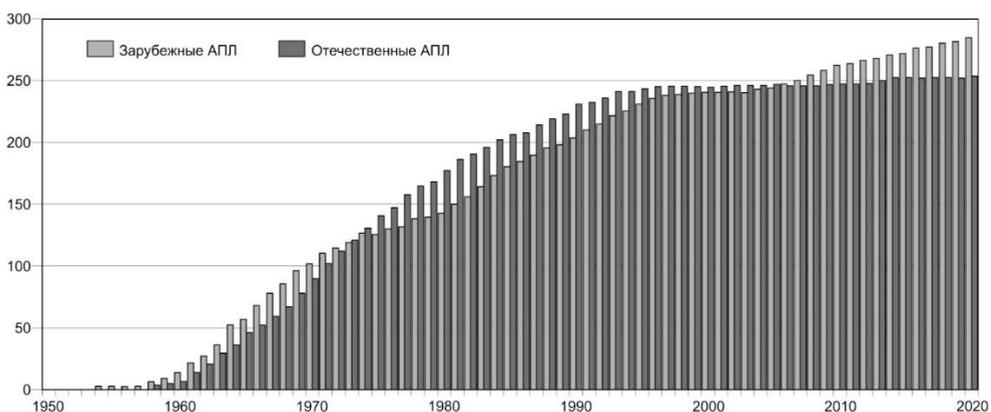


Рис. 8. Суммарное количество зарубежных и отечественных АПЛ, вводимых в состав флотов государств

На отечественных АПЛ периодически происходила смена поколений ядерных реакторов (рис. 9). Общая тенденция усовершенствований была связана с увеличением ресурса активных зон, последовательным переходом к блочной компоновке основного оборудования и ориентацией на создание унифицированных образцов.

Эти изменения позволили повысить надёжность и ремонтпригодность агрегатов и систем, а также улучшить общие виброакустические характеристики АПЛ.

В табл. 2 и 3 представлены основные характеристики отечественных и зарубежных атомных подводных лодок – стратегических и многоцелевых. При этом для сравнения отобраны базовые проекты [4].

Итоговый вывод можно сформулировать так: отечественные подводные атомоходы создавались в русле мировых тенденций и практически по всем характеристикам не уступали зарубежным аналогам.

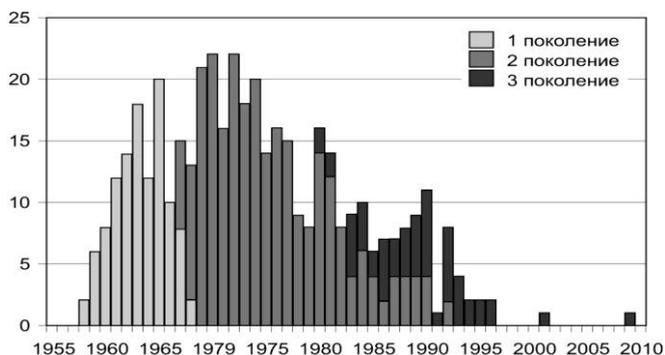


Рис. 9. Количество ежегодно вводимых в эксплуатацию корабельных ЯЭУ отечественных АПЛ

Таблица 2

Сравнение характеристик объектов отечественных и зарубежных АПЛ стратегического назначения

Основные ТТЭ	Ohio (США)	Triomphant (Франция)	Vanguard (Великобритания)	БДРМ (Россия)	Типа Борей (Россия)
Основные размерения:					
- длина, м	170,8	138,0	149,3	167,0	160,0
- ширина, м	12,8	12,5	12,8	12,0	13,6
- осадка, м	10,8	10,7	10,1	8,8	9,7
Водоизмещение полное подводное, тыс. м ³	18,8	14,6	15,85	18	24
Мощность корабельной ЯЭУ, МВт	н.д.	150	н.д.	2×90	190
Мощность корабельной ПТУ (ГЭД), тыс. л.с.	60	41,5	30	2×20	43
Максимальная скорость полного ПХ, уз.	25	25	25	24	29
Оружие:					
- количество БР;	24	16	16	16	16
- количество торпед	10	18	20	12	36
Глубина погружения предельная, м	550	500 (раб.)	400	400	480
Автономность, сут.	90	90	70	80-90	75
Коэффициент оперативного напряжения	0,63	0,5	0,5	0,6	0,5

В то же время было бы неверным представлять процессы создания и последующей эксплуатации наших головных и серийных АПЛ как цепь непрерывных успехов [19].

На этом пути встречалось множество проблем, связанных прежде всего с принципиально новой энергетикой, приобретением опыта эксплуатации АПЛ, становлением новых отраслей промышленности – атомного машиностроения и атомного судостроения. Лишь двумя из них являются: малая продолжительность кампании активных зон реакторов и низкая работоспособность парогенераторов из-за потери герметичности их трубными поверхностями.

Острота проблем определялась, в частности, тем, что они напрямую сказывались на боеспособности атомного подводного флота. Недоработки наряду с недостаточной надёжностью отдельных элементов основного оборудования и корпусных конструкций негативно влияли на показатели интенсивности эксплуатации атомных подводных лодок и надводных кораблей с ЯЭУ.

Таблица 3
Сравнение характеристик отечественных и зарубежных многоцелевых АПЛ

Основные ТТЭ	Virginia (США)	Barracuda (Франция)	Astute (Велико- британия)	971 (Россия)	Типа Ясень (Россия)
Основные размерения:					
- длина, м	115,0	99,4	97,0	110,0	135,2
- ширина, м	10,5	8,8	11,3	13,6	12,3
- осадка, м	9,3	7,3	10,0	9,6	9,4
Водоизмещение полное подводное, тыс. м ³	7,8	4,8	7,8	11,9	13,8
Мощность корабельной ЯЭУ, МВт	150	150	н.д.	190	190
Мощность корабельной ПТУ, тыс. л.с.	40	2×13	27,5	43	43
Максимальная скорость полного ПХ, уз.	34	25	29	33	31
Ракетно-торпедное вооружение, ед.	40	20	38	40	40
Глубина погружения предельная, м	500	400	450	600	600
Автономность	90	70	85	100	100
Коэффициент оперативного напряжения	0,65	0,5	0,5	0,6	0,5

На рис. 10 представлены результаты исследования интенсивности использования отечественных и зарубежных АПЛ, надводных кораблей и судов с ЯЭУ по состоянию на начало 2016 г. [20].

На рис. 11 и 12 дано сравнение интенсивности использования ЯЭУ американских и отечественных подводных лодок и надводных кораблей, а также атомных ледоколов, которая значительно (в 3–4 раза) превышала интенсивность и наработку основного оборудования корабельных установок при сопоставимых сроках службы кораблей и судов с ЯЭУ.

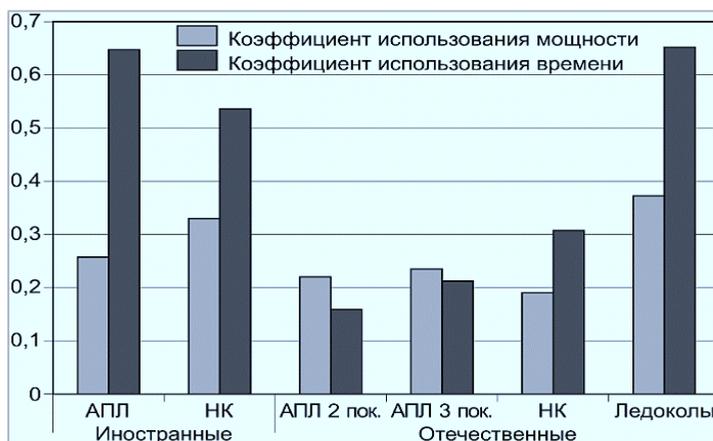


Рис. 10. Усреднённая интенсивность ежегодной эксплуатации иностранных и отечественных корабельных и судовых реакторов



Рис. 11. Распределение интенсивности боевых служб зарубежных ракетных АПЛ в 1981–2012 гг.

ПЛАРБ – подводная лодка атомная с баллистическими ракетами подводного пуска

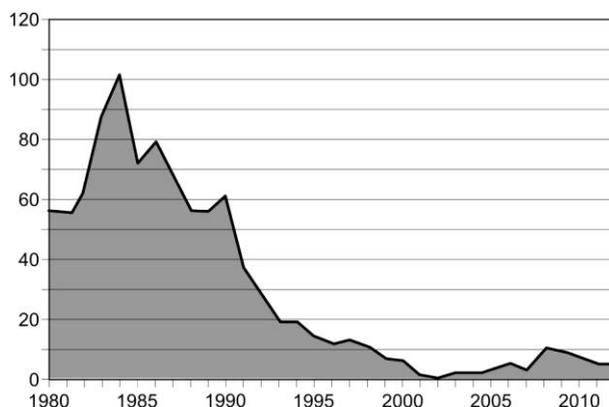


Рис. 12. Распределение интенсивности боевых служб отечественных ракетных АПЛ в 1981 – 2012 гг.

Интенсивность эксплуатации корабельных ядерных реакторов ВМС США в 2,5–3 раза выше интенсивности использования корабельных установок отечественных кораблей ВМФ. Более низкая интенсивность боевой службы наших АПЛ по сравнению с интенсивностью патрулирования АПЛ и надводных кораблей с ЯЭУ США объясняется меньшей продолжительностью кампании активных зон отечественных реакторов, что требовало более частых перезагрузок ядерного топлива. Другая причина, по-видимому, связана с меньшей надёжностью основного оборудования и корпусных конструкций. Однако жёсткий режим секретности, который последовательно соблюдается на протяжении всей истории американского атомного флота, не позволяет произвести достоверное сопоставление наших и американских АПЛ и надводных кораблей с ЯЭУ по частоте и характеру отказов оборудования, а также по авариям, в том числе имеющим экологические последствия.

В конце 1980-х годов начался массовый вывод атомных подводных лодок из боевого состава флота (рис. 13). Промышленная инфраструктура оказалась неподготовленной к их безопасной утилизации. Как результат – накопление хранящихся на плаву подводных лодок и многоотсечных реакторных блоков с отработавшим ядерным топливом. Пик этого накопления пришёлся на 1998 г., когда из 104 выведенных из состава Северного флота подводных лодок 79 оказались неутилизированными, причём 75 из них находились в отстое с топливом на борту.

Успешному решению этой проблемы способствовало проведение ряда мероприятий. В 1998 г. государственным заказчиком-координатором

комплексной утилизации атомных подводных лодок был назначен Минатом России. В 2003–2007 гг. в министерстве разработали Стратегический мастер-план (СМП) утилизации и экологической реабилитации выведенных из эксплуатации объектов атомного флота и их инфраструктуры в Северо-Западном регионе России – единую комплексную программу, обеспечивающую достижение научно обоснованных конечных целей и эффективное использование выделяемых ресурсов [21–23].

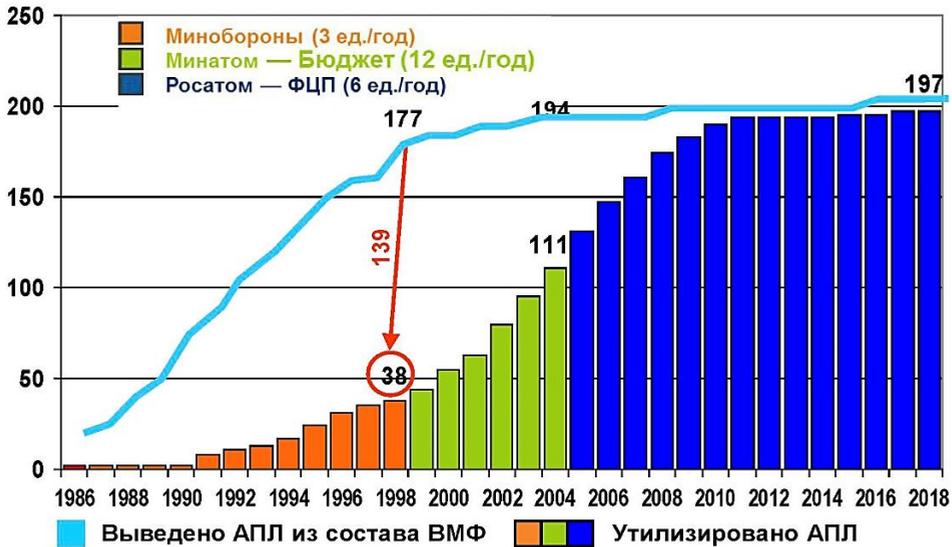


Рис. 13. Динамика вывода АПЛ из состава ВМФ и их утилизации

Обобщённый результат разработки Стратегического мастер-плана представлен на рис. 14 в виде «дорожной карты», на которой отображены все объекты утилизации (корабли, базы и пр.) и объекты инфраструктуры (заводы, хранилища, места переработки топлива и отходов), а также потоки продуктов утилизации в места безопасного хранения или окончательной изоляции. Реализация плана в целом проходила в соответствии с «дорожной картой», хотя по ходу работ принимались необходимые корректирующие решения.

Данные по итогам выполненных к настоящему времени работ по утилизации кораблей и радиоэкологической реабилитации объектов обслуживающей их инфраструктуры представлены в табл. 4.

На Северо-Западе утилизированы все атомные подводные лодки, входившие в первоначальный мастер-план (включая аварийные). В работе

лишь три вновь выведенных из состава ВМФ корабля, и теперь их утилизация – уже рутинный процесс. Сходная ситуация и на Дальнем Востоке.

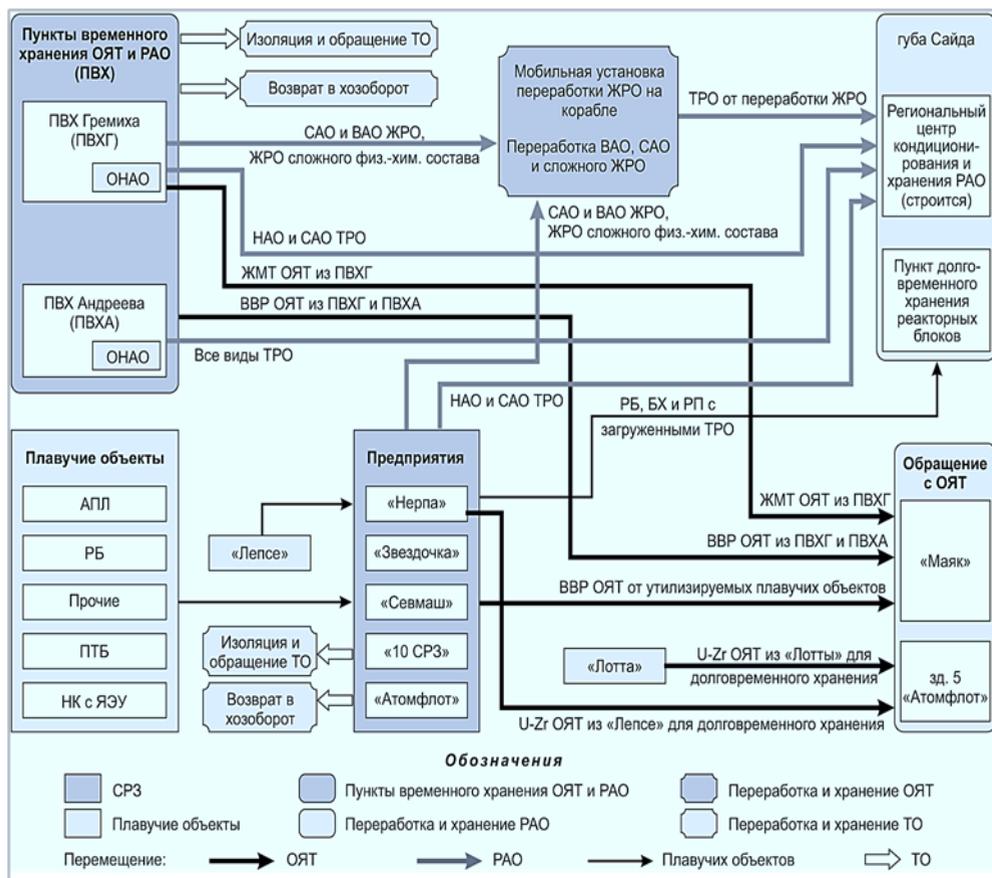


Рис. 14. Стратегия высшего уровня – «дорожная карта» СМП

ТО – токсичные отходы, ОНАО – очень низкоактивные отходы, ПТБ – плавучая техническая база, РБ – реакторный блок, ВВР ОЯТ – отработавшее ядерное топливо водо-водяных реакторов, ЖМТ ОЯТ – отработавшее ядерное топливо реакторов с жидкотеплоносительным теплоносителем, БХ – блок хранения (образуется из хранилища топлива на ПТБ), РП – реакторное помещение (при утилизации надводных кораблей и ледоколов), СРЗ – судоремонтный завод, НК с ЯЭУ – надводный корабль с ядерной энергетической установкой

На рис. 15 показан масштаб проблемы ликвидации потенциальных угроз обширного радиационного загрязнения Северо-Западного региона. Более половины основного радиационного потенциала, накопленного в отработавшем ядерном топливе, удалено из региона, топливо переработано на Производственном объединении «Маяк».

Таблица 4

Итоговые данные по утилизации АПЛ по состоянию на конец 2020 г.

Атомные подводные лодки	Северный флот	Тихоокеанский флот	Всего
Выведено АПЛ из состава ВМФ	124	83	207
Утилизировано АПЛ	120	80	200
АПЛ в стадии утилизации		1	1
АПЛ ожидают утилизации	3	2	5
Особое решение (Б-159)	1		1
АПЛ с невыгруженным ОЯТ	4		4
АПЛ с выгруженным ОЯТ	120	81	201
Реакторные блоки и отсеки	Северный флот	Тихоокеанский флот	Всего
Многоотсечные реакторные блоки			
На стапеле (в доке)		4	4
На плаву	1	9	10
В пункте изоляции (с ОЯТ)		2	2
Реакторные отсеки			
Сформировано	123	65	188
Размещено в пунктах долговременного хранения	123	65	188

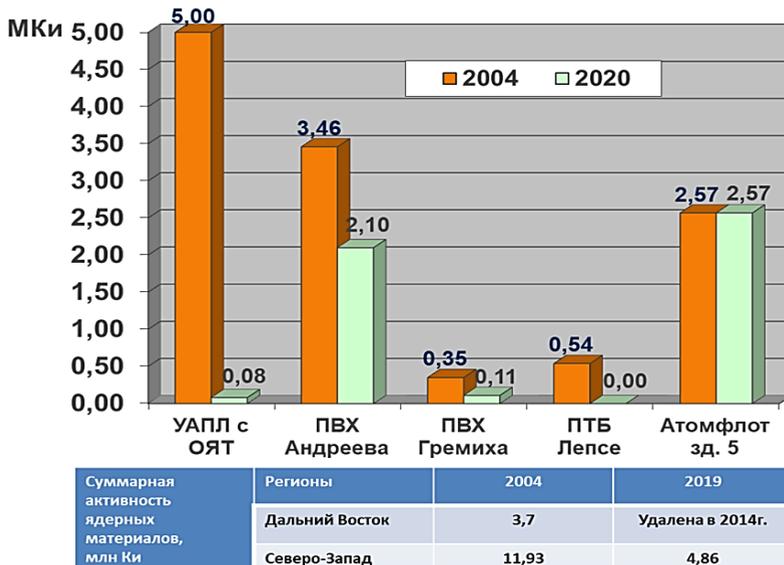


Рис. 15. Изменение радиационного потенциала от ОЯТ в Северо-Западном регионе Российской Федерации с начала и после завершения массовой утилизации

Интенсивный вывоз отработавшего топлива из хранилища в губе Андреева продолжается и может быть завершён в текущем десятилетии.

Строительство мощного отечественного атомного флота, создание масштабной инфраструктуры для его обслуживания, успешная эксплуатация новой для флота техники способствовали решению возложенных на ВМФ стратегических и оперативно-тактических задач и обеспечило паритет в противостоянии с боевым потенциалом западного блока в годы холодной войны. Этому в немалой степени способствовала хорошо продуманная и четко организованная упреждающая подготовка кадров. Основное внимание при этом было уделено подготовке высококвалифицированных инженерных кадров ядерно-энергетического профиля. Еще за год до спуска на воду первой АПЛ незадолго до этого созданному Севастопольскому высшему военно-морскому инженерному училищу было поручено начать подготовку инженерных кадров для атомных подводных лодок. Через год такая же задача была поставлена Ленинградскому Высшему военно-морскому инженерному училищу им. Ф.Э. Дзержинского. Но по числу выпускаемых специалистов Севастопольское ВВМИУ в течение всех последующих лет оставалось основной базой подготовки инженерных кадров ядерного профиля для интенсивно создающегося советского атомного подводного флота.

Иллюстрацией уровня подготовки инженерных кадров для АПЛ является техническое оснащение училища. Здесь были построены:

единственный в мире в составе ВУЗа учебно-исследовательский реактор ИР-100;

учебно-лабораторный комплекс со всеми основными элементами ядерной энергетической установки АПЛ второго поколения (пр. 670);

подкритическая уран-водная сборка с блоками из природного урана;

мощный по тому времени вычислительный центр;

опытный гидродинамический бассейн;

поточные аудитории, оснащенные индивидуальными электронными тренажерами и множеством других учебных и исследовательских установок и стендов.

Учебный процесс сочетался с масштабной исследовательской работой, в которую активно вовлекались и курсанты. Не случайно, министр обороны маршал Советского Союза Д.Ф. Устинов своим приказом в 1983 году объявил училище лучшим высшим военным учебным заведением страны.

Автор данного раздела – академик А.А. Саркисов (рис. 16) прослужил в этом училище с самого его зарождения без малого 20 лет, пройдя путь от преподавателя кафедры ядерных реакторов и парогенераторов до начальника училища и все эти масштабные преобразования осуществлялись при его непосредственном участии.



Рис. 16. А.А. Саркисов, советник РАН, вице-адмирал, академик РАН, доктор технических наук

В начале этого раздела отмечалось что Военно-морской флот встретил предложение Минсредмаша о разработке ядерной силовой установки для подводной лодки весьма сдержанно. Отношение ВМФ к работам по созданию подводной лодки с ядерной энергетической установкой резко изменилось после назначения главнокомандующим адмирала С.Г. Горшкова.

Стране по-настоящему повезло, что именно в те годы Академию наук СССР возглавлял академик Анатолий Петрович Александров (рис. 17), которого по праву называют отцом отечественного атомного флота, Военно-морским флотом командовал адмирал флота Советского Союза Сергей Георгиевич Горшков (рис.18), Министерство среднего машиностроения возглавлял Ефим Павлович Славский (рис. 19), а Министерство судостроительной промышленности – Борис Евстафьевич Бутома (рис. 20).

Все они, несомненно, были выдающимися государственными деятелями, талантливыми руководителями, яркими и неординарными личностями.



Рис. 17. Президент Академии наук СССР (1975–1986) академик Александров Анатолий Петрович



Рис. 18. Главнокомандующий Военно-Морским Флотом СССР (1956–1985) адмирал флота Советского Союза Горшков Сергей Георгиевич



Рис.19. Министр среднего машиностроения СССР (1965–1986) Славский Ефим Павлович



Рис. 20. Председатель Государственного Комитета Совета Министров СССР по судостроению – министр СССР (1957–1963) Бутома Борис Евстафьевич



Рис. 21. Председатель Комитета по Ленинским премиям Президент Академии наук СССР академик АН СССР А.П. Александров вручает Главнокомандующему Военно-Морским флотом адмиралу флота Советского Союза С.Г. Горшкову нагрудный знак лауреата Ленинской премии

Особо хотелось бы отметить исключительно слаженную работу Главкомата Военно-морского флота во главе с С.Г. Горшковым и возглавляемого академиком А.П. Александровым главного штаба отечественной науки – Академии наук СССР, чему в немалой степени способствовала и их личная дружба (рис. 21).

В значительной степени, в том числе благодаря этому, в 1980–1990-е годы в нашей стране удалось создать достаточно эффективную группировку ракетных подводных крейсеров стратегического назначения, образовавшую костяк морских сил стратегического ядерного сдерживания, и выработать действенные меры по обеспечению их боевой устойчивости (таблица 5) [24].

В свою очередь, многоцелевые атомные подводные лодки наряду с задачей обеспечения боевой устойчивости своих стратегических ракетных подводных лодок были способны вести поиск и при обнаружении длительное слежение за ракетными подводными лодками вероятного противника.

Атомный подводный флот СССР осуществлял ядерное сдерживание и контролировал важные стратегические районы Мирового океана.

ВМФ СССР в 1980–1990-х годах достиг стратегического паритета с ВМС США, стал вторым флотом в мире, предотвратил возможность нападения на СССР, обеспечил сохранение мира и мирного сосуществования двух великих морских держав. С началом 1990-х годов при вынужденном выводе в резерв большого количества кораблей баланс военно-морских потенциалов, соперничающих в Мировом океане стран, был резко нарушен, после чего понятие «ядерный паритет» потеряло военно-политический смысл. Реалии сегодняшнего дня говорят о том, что развитие подводных сил России как главного рода сил ВМФ постоянно находится в центре внимания всех структур, отвечающих за обороноспособность нашего Отечества. Объективные условия вооружённой борьбы в ядерной войне выдвигают в качестве одного из основных компонентов ударной силы ракетно-ядерный флот, где рационально сочетаются новейшие достижения науки и техники, огромная ударная мощь и мобильность, живучесть стратегических средств и высокая готовность к их немедленному использованию.

Работы по внедрению ЯЭУ на морские суда, корабли ВМС и глубоководные аппараты продолжаются, в том числе с отработкой основного оборудования на стендах, в Аргентине, Бразилии, Великобритании, Индии, Иране, Канаде, Китае, Пакистане, США, Франции, Японии и в других странах. К объективным преимуществам кораблей с ЯЭУ относят их повышенную скрытность и практическое отсутствие выбросов парниковых газов. Это позволяет говорить о том, что ядерная энергетика и в дальнейшем должна обеспечивать энергетические потребности кораблей океанской зоны.

Среди особенностей строящихся и проектируемых корабельных ЯЭУ можно назвать:

- внедрение модернизированной, более компактной по конструкции реакторной установки, которая отличается меньшим числом компонентов и существенно большей энергонапряжённостью по сравнению с эксплуатируемыми установками;

- применение перспективных технологий, обеспечивающих значительное снижение стоимости технического обслуживания;

- повышение долговечности реакторного оборудования с учётом проектов, предусматривающих длительный (до 45–50 лет) срок службы корабля.

Основными тенденциями развития корабельной ядерной энергетики являются:

использование ЯЭУ с водо-водяными реакторами при их стендовой отработке на временных базах;

унификация и эволюционное развитие ЯЭУ для большой серии кораблей; повышение надёжности и безопасности;

улучшение вольтамперной характеристики корабельных ЯЭУ;

увеличение продолжительности кампании активной зоны.

Опыт интенсивной эксплуатации и тенденции развития зарубежных корабельных ЯЭУ необходимо использовать для создания перспективных отечественных кораблей и судов при формировании их облика, а в последующем – основного реакторного и энергетического оборудования.

Следует использовать наработки, направленные на повышение безопасности и надёжности эксплуатации корабельных систем и механизмов, оптимизацию их массогабаритных, виброакустических и экономических характеристик.

В заключение обобщим исторические уроки, полученные в ходе решения грандиозной задачи создания отечественного атомного флота, обеспечившего геополитический паритет в противостоянии нашей страны западному блоку:

- создание отечественного атомного флота стало возможным благодаря достигнутому в СССР высокому научному потенциалу в различных областях знаний, а также беспрецедентной концентрации производственных и людских ресурсов;

- создание принципиально новых образцов боевых и технических средств без учёта должного опыта вынудило применять нетрадиционные подходы, что стало определённым преимуществом, но было связано с риском принятия неоптимальных или даже ошибочных решений;

- в ходе технического прогресса, несомненно, к позитивным факторам можно отнести опережающую инициативу научных и производственных коллективов;

- к важным условиям реализации новых идей и решений относится организованная система подготовки высококвалифицированных кадров;

- непродуманность и необеспеченность всех этапов жизненного цикла изделия чревата серьёзными проблемами и ведёт к материальным издержкам;

- количество построенных АПЛ несомненно оказывает влияние на паритет военно-стратегических потенциалов противоборствующих группировок, в то же время непереносимое стремление опередить противника по количественным параметрам может привести к отставанию в ключевых технических и боевых характеристиках создаваемого изделия (виброакустика, скрытность, продолжительность кампании на одной загрузке активной зоны, надёжность и долговечность энергетической установки, общекорабельных систем и корпусных конструкций, коэффициент использования мощности и общее время пребывания АПЛ на боевой службе);

- важнейшее условие при реализации масштабных проектов – допускаемое целевым назначением ограничение номенклатуры проектов и унификация основного оборудования.

БЛАГОДАРНОСТИ

Выражаю благодарность профессору капитану 1 ранга С.А. Петрову за обсуждение и предоставленные сравнительные статистические данные по динамике ввода в строй и эксплуатации отечественных и зарубежных АПЛ и надводных кораблей с ЯЭУ, а также моим коллегам кандидату физико-математических наук М.Н. Кобринскому, капитанам 1 ранга Б.Н. Филину и П.А. Шведову за помощь в подготовке настоящего раздела книги.

Литература

1. Российская наука – Военно-морскому флоту / Под общей ред. академика А.А. Саркисова. – М.: Наука, 1997.
2. Роль российской науки в создании отечественного подводного флота / Под общей ред. академика А.А. Саркисова. – М.: Наука, 2008.
3. Ган О. Die Muttersubstanz des Actiniums, ein neues radioaktives Element von langer Lebensdauer // Phys. ZS. Bd. 19. № 10. S. 208–218.
4. Дайджест зарубежной прессы по вопросам кораблестроения. СПб.: ФГУП «Крыловский ГИИ», 1992–2020. № 1–94.
5. Новиков И.И. Термодинамика. – Л.: Судостроение, 1984.
6. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. Изд-е 5-е перераб. и доп. – М.: Атомиздат, 1979.
7. Лаврентьев М.А., Шабат Б.В. Проблемы гидродинамики и их математические модели. – М.: Наука, 1973.
8. Сташкевич А.П. Акустика моря. – Л.: Судостроение, 1966.

9. Андреева И.Б. Физические основы распространения звука в океане. – Л.: Гидрометеиздат, 1975.
10. Акустика океана / Под ред. Л.М. Бреховских. – М.: Наука, 1974.
11. Зюзев А.П., Огородова Л.В. Гравиметрия. – М.: Недра, 1980.
12. Ледяные образования морей Западной Арктики / Под ред. Г.К. Зубакина. – СПб.: ААНИИ, 2006.
13. Апальков Ю.В. Подводные лодки ВМФ СССР. Справочник. – СПб.: Галей Принт, 2006.
14. Горынин И.В., Леонов В.П., Михайлов В.И. Морские титановые сплавы // Судостроение. 2009. № 5(786). С. 22–24.
15. Дергачёв Ф.Г. Первая в мире титановая высокоскоростная подводная лодка проекта 661 // Судостроение. 2007, № 2(771). С. 19–24.
16. Отечественные подводные лодки. Проектирование и строительство / Под общей ред. академика РАН В.М. Пашина. СПб.: ЦНИИ им. академика А.Н. Крылова, 2004.
17. Разлёт Б.К. История Санкт-Петербургского морского бюро машиностроения «Малахит». В 4-х томах. Т. 1. Специальное конструкторское бюро № 143 – Союзное проектно-монтажное бюро машиностроения, 1948-1974 годы. – СПб.: СПМБМ «Малахит», 2002.
18. Григорьев Б.В. Корабль, опередивший время (история создания и эксплуатации атомных подводных лодок проекта 705). – СПб.: Тайфун, 2003.
19. Петров С.А., Василенко В.А., Каплиенко А.В. Перспективы развития корабельных ЯЭУ зарубежных государств. – СПб.: ООО «Литография СПб», 2014.
20. Лобнер П. Морская атомная энергетика: 1939–2018. Слайдовый доклад с данными о российских кораблях с ЯЭУ, их системах вооружения, а также о тенденциях развития морской атомной энергетики в России на период до 2030 года.
21. Стратегические подходы к решению экологических проблем, связанных с выведенными из эксплуатации объектами атомного флота на Северо-Западе России / Под ред. академика А.А. Саркисова. – М.: Наука, 2010.
22. Радиоэкологические последствия эксплуатации и утилизации объектов атомного флота в Дальневосточном регионе / Под ред. академика А.А. Саркисова. – М.: Институт безопасного развития атомной энергетики, 2010.
23. Strategic Master Plan for Decommissioning of the Retired Russian Nuclear Fleet and Environmental Rehabilitation of Its Supporting Infrastructure in Northwest Russia. Programme of Priority Project. Moscow, 2006.
24. Откуда исходит угроза миру. – М.: Воениздат, 1987.

Ю.Г. Драгунов¹, Е.Л. Ромадова²

КОСМИЧЕСКАЯ ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

В настоящем разделе книги представлена информация о результатах разработки ядерных энергетических установок для использования в космических аппаратах – ядерных ракетных двигателей (ЯРД) и ядерных энергетических установок (ЯЭУ), в том числе:

первых реакторных установках, созданных для обоснования ЯРД;

ЯЭУ с использованием прямого преобразования тепловой энергии ядерного реактора в электрическую;

реакторной установки для транспортно-энергетического модуля на основе ядерной энергодвигательной установки мегаваттного класса.

Приведены результаты выполненных комплексов исследований, включая моделирование нейтронной физики, теплообмена и газодинамики, испытания полномасштабных макетов основных узлов реакторной установки, о проведении контрольного физического пуска.

Успешная реализация Атомного проекта обеспечила создание в стране уникального научно-технического и производственного потенциала. И.В. Курчатова поставил задачу внедрения ядерных технологий в мирные отрасли, в том числе для обеспечения источников энергии для использования в космических аппаратах. Невозможно переоценить важность освоения космоса и значение энергетики для решения этой задачи [1, 2].

4 октября 1957 г. был запущен первый искусственный спутник земли. И вскоре после этого академик И.В. Курчатова пригласил в институт ведущих представителей атомной, авиационной и космической науки и техники. Он поздравил академика С.П. Королева с успешным запуском спутника и поставил задачу по созданию ядерных энергетических источников для космоса – ядерных ракетных двигателей (ЯРД) и ядерных энергетических установок

¹ Научный руководитель космических ядерных установок АО «НИКИЭТ», заведующий кафедрой «Ядерные реакторы и установки» МГТУ им. Н.Э. Баумана, член-корреспондент РАН.

² Главный конструктор космических ядерных установок – директор отделения АО «НИКИЭТ», кандидат технических наук.

(ЯЭУ). На этой встрече член-корреспондент АН СССР В.М. Иевлев, представлявший НИИТП (ныне ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша»), доложил об основных работах в данном направлении. Для их развития требовалось создать высокотемпературный импульсный графитовый реактор.

По инициативе И.В. Курчатова 13 января 1958 года проведено совещание по разработке мощного импульсного реактора для исследования топлива и конструкционных материалов при температурах до 300 градусов, 27 марта этого же года рассмотрены основы проекта, а уже 13 мая 1958 года вышло постановление правительства о создании на объекте 905 Министерства обороны (Семипалатинский ядерный полигон) высокотемпературного импульсного графитового реактора (ИГР). Его называли реактор взрывного действия. Он был предназначен для высокотемпературных динамических испытаний топливных и конструкционных материалов. Научный руководитель реакторного комплекса – Институт атомной энергии (РНЦ «Курчатовский институт»), главный конструктор реактора – НИКИЭТ.

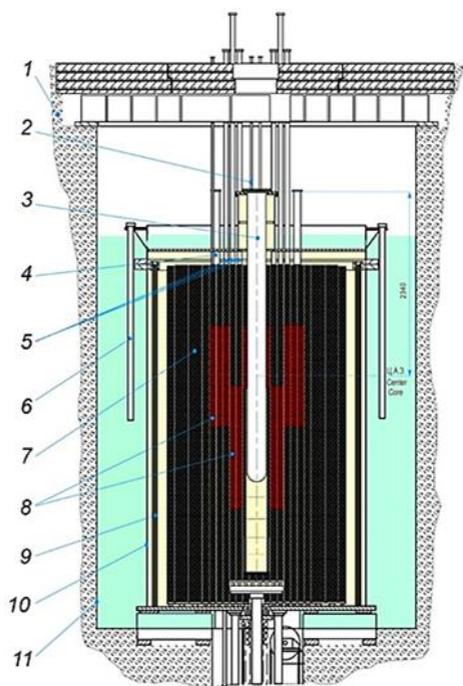


Рис. 1. Реактор ИГР:

- 1 – биологическая защита;
- 2 – канал физических измерений;
- 3 – центральный экспериментальный канал;
- 4 – боковой экспериментальный канал;
- 5 – каналы органов регулирования;
- 6 – канал ионизационной камеры;
- 7 – отражатель; 8 – активная зона;
- 9 – экран боковой; 10 – кожух;
- 11 – бак с охлаждающей водой

Реактор, схема которого показана на рис. 1, является импульсным реактором на тепловых нейтронах с гомогенной активной зоной, которая

представляет собой кладку из ураносодержащих графитовых блоков, собранных в виде колонн. Отражатель реактора собран из аналогичных графитовых блоков, не содержащих уран. Реактор не имел принудительного охлаждения активной зоны. Тепло, выделившееся при работе реактора, аккумулировалось кладкой, затем через стенки корпуса реактора передавалось воде контура расхолаживания.

Реактор работал в двух основных режимах:

в режиме нерегулируемого самогасящегося нейтронного импульса, амплитуда и длительность которого определяются начальной реактивностью, сообщаемой реактору, мощность в этом случае гасится за счет большего отрицательного температурного эффекта реактивности;

в регулируемом режиме, при котором мощность реактора изменяется по заранее заданному закону, регулируемому посредством перемещения рабочих органов СУЗ.

Для размещения объекта исследований (испытуемой ТВС) в реакторе имелся центральный экспериментальный канал, оснащенный водоохлаждаемой ампулой.

Основные технические характеристики реактора ИГР приведены в таблице 1.

Таблица 1

Основные технические характеристики реактора ИГР

Характеристика	Значение
Мощность в импульсном режиме (пиковая), ГВт	10
Мощность в стационарном режиме, ГВт	≤ 1
Полуширина импульса минимальная, с	0,12
Длительность регулируемого режима, с	$1 \div 10^6$
Максимальная плотность потока тепловых нейтронов, н/см ² ·с	$7 \cdot 10^{16}$
Максимальный флюенс тепловых нейтронов, н/см ²	$3,6 \cdot 10^{16}$
Загрузка ²³⁵ U, кг	9
Высота активной зоны, мм	1460
Диаметр центрального экспериментального канала, мм	228

В центральном канале реактора в 1962–1964 гг. были проведены первые три серии кратковременных испытаний макетных тепловыделяющих сборок (ТВС), в ходе которых была экспериментально доказана возможность нагрева водорода – рабочего тела ЯРД до температуры ~ 3000 К. Это обеспечивало получение импульса тяги, вдвое превосходящего удельный импульс тяги

самых эффективных ракетных двигателей (РД) на жидком топливе водород-кислород.

Результаты испытаний на реакторе ИГР стали базой для подготовки постановления правительства страны от 13 августа 1964 г. о создании исследовательского реактора ИВГ.1 для испытаний на ресурс полномасштабных ТВС ЯРД. Научным руководителем проекта был определен Институт атомной энергии, а главным конструктором этого реактора – НИКИЭТ.

Реактор ИВГ.1 – исследовательский высокотемпературный газоохлаждаемый гетерогенный корпусной канального типа на тепловых нейтронах с легководным замедлителем и бериллиевым отражателем нейтронов (рис. 2) [3, 4]. Испытываемые газоохлаждаемые ТВС размещались в технологических каналах ячеек активной зоны реактора. В центральной ячейке активной зоны был расположен петлевой канал диаметром 164 мм, а 30 периферийных ячеек диаметром 72 мм каждая располагались на трех концентрических окружностях (кольцевых рядах), находящихся на различном расстоянии от вертикальной оси реактора. Внутрикорпусные элементы конструкции и наружные поверхности корпусов технологических каналов охлаждались водой.

В реакторе ИВГ.1 предусмотрена возможность групповых и петлевых испытаний ТВС, причем при любом варианте испытаний возможно одновременно испытывать ТВС разных модификаций.

При петлевых испытаниях активная зона реактора набирается из 31 технологического канала, причем один из них устанавливается в центральный петлевой канал, где с помощью специальной бериллиевой конструкции обеспечивается повышение в 2 раза плотности потока тепловых нейтронов относительно среднего (по всей активной зоне) потока.

При групповых испытаниях активная зона комплектуется 30 каналами, в центральную ячейку устанавливается петлевой канал с вытеснителем из бериллия.

Основные технические характеристики реактора ИВГ.1 (проектные) приведены в табл. 2.

В 1975 г. состоялся энергопуск ИВГ.1. Всего в 1975–1988 гг. было проведено 30 пусков ИВГ.1, в которых были испытаны 4 опытные активные зоны, более 200 газоохлаждаемых ТВС ЯРД.

Испытания подтвердили правильность выбранной в отечественной программе концепции построения ЯРД, а значительная часть достигнутых в ходе испытаний результатов является уникальной в мировой практике.

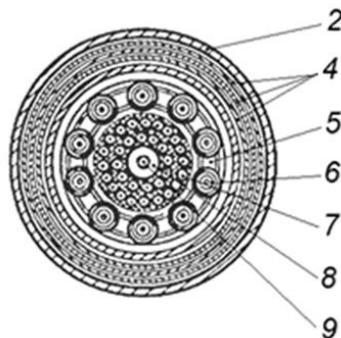
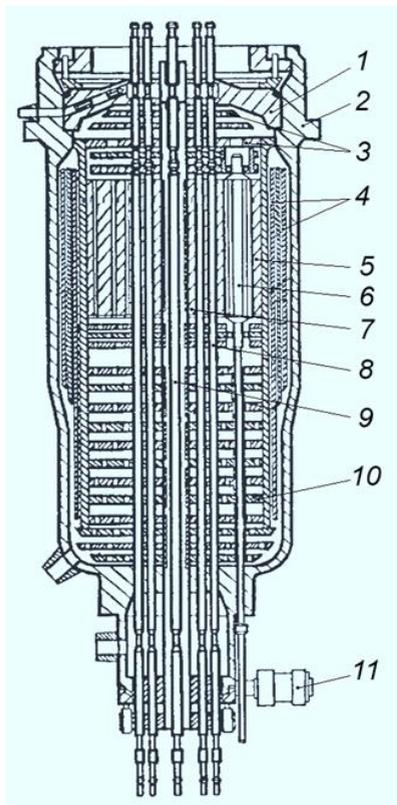


Рис. 2. Схема реактора ИВГ.1:

- 1 – крышка;
- 2 – корпус;
- 3 – верхние экраны;
- 4 – боковые экраны;
- 5 – отражатель;
- 6 – регулирующие барабаны;
- 7 – центральная сборка;
- 8 – технологический канал; 9 – петлевой экспериментальный канал;
- 10 – железоводная защита;
- 11 – привод регулирующего барабана

Таблица 2

Основные технические характеристики реактора ИВГ.1

Наименование параметра	Значение
Тепловая мощность, МВт	720
Эффективный диаметр активной зоны, мм	548
Высота активной зоны, мм	800
Загрузка ^{235}U , кг	$\leq 16,5$
Плотность потока тепловых нейтронов, $\text{n}/\text{cm}^2\cdot\text{c}$	$3,6 \cdot 10^{15}$
Расход воды через реактор, кг/с	380
Рабочее давление в корпусе реактора, МПа	5

Успешное проведение испытаний ТВС в реакторе ИВГ.1 позволило приступить к созданию и испытаниям первого наземного прототипа ядерного ракетного двигателя [5].

26 февраля 1971 года вышло постановление правительства о проведении стендовой отработки и создании ЯРД с тягой 400 кН (проект 11Б91). Главным конструктором было определено КБ Химавтоматики, научным руководителем – НИИТП (ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша»).

На рис. 3 показаны комплексы, созданные на Семипалатинском ядерном полигоне. Работы по созданию ядерного ракетного двигателя изложены в монографии [5].

Следует отметить значительную роль НИИТП (ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша») в работах по исследованию теплофизики ЯРД, по материаловедению, а также в разработке совместно с НИИ-9 (ВНИИНМ) первой конструкции тепловыделяющей сборки, в разработке совместно с Физико-энергетическим институтом (ФЭИ) реакторов минимальных размеров ИР-20 и ИР-100, разработке газофазного реактора, разработке технического задания на проектирование испытательной базы, в создании наземного прототипа ЯРД.

Одновременно с нашей страной также активно велась разработка ЯРД в США. Национальная программа США по ядерным ракетам ROVER/NERVA охватывала период с 1959 по 1972 г. В США в этой области были испытаны около 40 установок с ЯРД, более 20 подверглись полномасштабным испытаниям, в том числе были отработаны двигатели в целом, включая подачу жидкого водорода. За основу конструкции ЯРД был принят гомогенный реактор с активной зоной из графита и осевым течением водорода. Программа была признана одной из наиболее успешных технических разработок самой передовой технологии США.

Ориентация советских ученых и конструкторов на гетерогенный реактор и поэлементную отработку его узлов обозначила фундаментальное различие программ создания ЯРД в СССР и США, и это различие оказалось, как было позднее признано в том числе и американскими специалистами, в пользу советской программы [4].

Главным итогом советских работ по реализации программы создания ЯРД явилась отработанная технология производства и ресурсных испытаний ТВС и других узлов реактора. Достигнутые температура выхода водорода из реактора и суммарное время работы при этой температуре существенно превысили аналогичные показатели в США. При этом общая сумма затрат на отработку технологии ЯРД в России была значительно меньше, чем в США.

Основные результаты этого более чем 30-летнего соревнования СССР и США, приведены в табл. 3.



Реактор ИВГ.1



Реактор ИГР



ЯРД 11B91

Рис. 3. Наземные прототипы ядерных ракетных двигателей СССР

Таблица 3

Основные результаты создания ЯРД в СССР и США

Показатели	СССР	США	
Период активных действий по тематике, годы	1961–1989	1959–1972	
Затраченные средства, млрд долл.	0,3	2,0	
Количество изготовленных реакторных установок, шт.	5	20	
Принципы отработки и создания	поэлементный	интегральный	
Топливная композиция	Твердый раствор UC-ZrC, UC-ZrC-NbC	UC2 в графитовой матрице	
Теплонапряженность активной зоны, средняя/максимальная, МВт/л	15 / 33	2,3 / 5,1	
Максимально достигнутая температура рабочего тела, К	3100	2550	2200
Удельный импульс тяги, с	~ 940	~ 850	
Ресурс работы на максимальной температуре рабочего тела, с	4000	50	2400

Важнейшим направлением работ в области создания ЯЭУ космического назначения является разработка установок с прямым преобразованием энергии [4]. Первая установка – термоэлектрический реактор-преобразователь «Ромашка», была создана в Институте атомной энергии в кооперации с ПНИТИ (НИИ НПО «ЛУЧ») и Сухумским физико-техническим институтом (СФТИ), пуск осуществлен 14 августа 1964 года. Реактор-преобразователь проработал в непрерывном режиме около 15000 часов, выработав 6100 квт-час электроэнергии [4].

Начиная с 1960 года была начата разработка космических средств для обеспечения морской разведки и целеуказанием нового поколения – «Легенда» (генеральный конструктор – академик А.И. Савин). Разработка ЯЭУ для этих средств была поручена НПО «Красная Звезда», научным руководителем и разработчиком электрогенерирующих каналов был определен Физико-энергетический институт.

Разработка велась для двух типов ЯЭУ: с термоэлектрическим преобразованием тепловой энергии ядерного реактора в электрическую энергию (ЯЭУ-БУК) и с термоэмиссионным преобразованием (ЯЭУ ТОПАЗ-1).

Были осуществлены 31 пуск космических аппаратов с ЯЭУ-БУК и 2 пуска космических аппаратов с ЯЭУ ТОПАЗ-1.

В этот же период разрабатывалась ЯЭУ «ЕНИСЕЙ». Главный конструктор – Центральное Конструкторское бюро машиностроения, научный руководитель – Институт атомной энергии, технолог и разработчик электрогенерирующих каналов – ПНИТИ (НИИ НПО «ЛУЧ»). К 1988 году установка «ЕНИСЕЙ» прошла полный комплекс наземных испытаний, был подтвержден ресурс 1,5 года, на основе расчетного моделирования показана возможность достижения ресурса 3 года [4]. Важнейший вклад в создание установок с прямым преобразованием энергии и в создание ЯРД внес академик Н.Н. Пономарев-Степной.

В период 1997–2009 г. были разработаны концептуальные проекты космических ядерных энергосистем [6]. Эти проработки и весь опыт предшествующих работ по данной тематике позволили перейти к разработке ЯЭУ мегаваттного класса с турбомашинным преобразованием энергии. Инициатором этих работ стал академик А.С. Коротеев (ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша»).

Госкорпорации «Росатом» поручено создание реакторной установки (РУ) на основе быстрого газоохлаждаемого реактора, в качестве теплоносителя применена гелий-ксенонная смесь. Технические характеристики ЯЭУ были существенно выше, чем у разрабатываемых мировых аналогов: температура теплоносителя на выходе из реактора до 1500 градусов по шкале Кельвина, срок службы не менее 10 лет.

Это стало принципиально новым этапом в создании ЯЭУ для космических аппаратов. В соответствии с техническим заданием мощность должна быть увеличена более чем на два порядка, а ресурс увеличен на порядок по сравнению с установками, ранее прошедшими летные испытания. НИКИЭТ им. Н.А. Доллежала был назначен головным исполнителем, главным конструктором реакторной установки.

Это была командная работа при реализации такого амбициозного проекта. В проекте работали многие: РНЦ «Курчатовский институт» – научный руководитель, разработчик нормативной документации по ядерной и радиационной безопасности; ведущие институты научного блока ГК «Росатом» (ГНЦ Физико-энергетический институт, НИИ НПО «ЛУЧ», НИИ атомных реакторов, НИИ реакторного материаловедения); Федеральные ядерные центры; комбинаты и заводы, обеспечившие изготовление топлива и ТВЭЛ; предприятия ГК Роскосмос (Центр Келдыша, РКК «Энергия», НПО машиностроения), институты РАН (Институт теплофизики им. Кутателадзе СО РАН, Институт машиноведения РАН, Институт физики твердого тела РАН), МГТУ им. Н.Э. Баумана, МЭИ, МИФИ и другие предприятия.

Схема разработанной ядерной энергодвигательной установки приведена на рис. 4 [1].

В рамках выполнения опытно-конструкторских работ были разработаны эскизный и технический проекты, разработана рабочая документация на опытный образец реакторной установки и ее составные части. Разработан ряд новых технологий, созданы производственные комплексы и модернизирована испытательная база, изготовлены и испытаны макеты составных частей РУ, изготовлен полномасштабный конструкторско-технологический макет реакторной установки. Проект разработан с использованием современного суперкомпьютера, позволившего на основе 3D-моделирования обеспечить высокое качество проекта и оптимизировать проведение экспериментов в рамках программы экспериментальной отработки РУ.

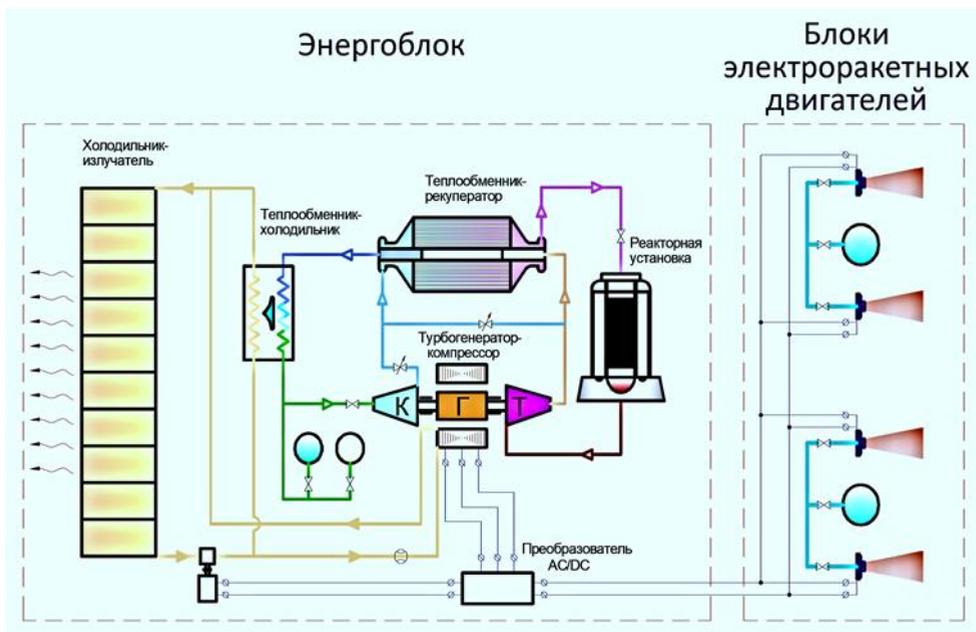


Рис. 4. Схема ядерной энергодвигательной установки

Выполнен комплекс исследований, конструкторских разработок и испытаний, включая исследование изменения свойств топлива и конструкционных материалов в условиях облучения в реакторах, моделирование нейтронной физики, теплообмена и газодинамики, испытание полномасштабных макетов основных узлов реакторной установки: корпуса реактора, радиационной защиты, приводов системы управления и защиты, регулирующих органов, фрагментов активной зоны [7–10].

На рис. 5 иллюстрируются результаты моделирования нейтронной физики, теплообмена и газодинамики. В процессе работы выработаны рекомендации по расчету коэффициентов теплопередачи и термодинамическим свойствам гелий-ксенонной смеси [11].

На рис. 6 приведена информация об экспериментах, выполненных для верификации расчетных кодов.

С использованием верифицированных кодов в АО «НИКИЭТ» выполнен комплекс расчетов в обоснование проекта реакторной установки, включая анализы безопасности в различных режимах. В РФЯЦ-ВНИИЭФ выполнены расчетные исследования в обоснование безопасности при различных аварийных ситуациях при падении космического аппарата на Землю.

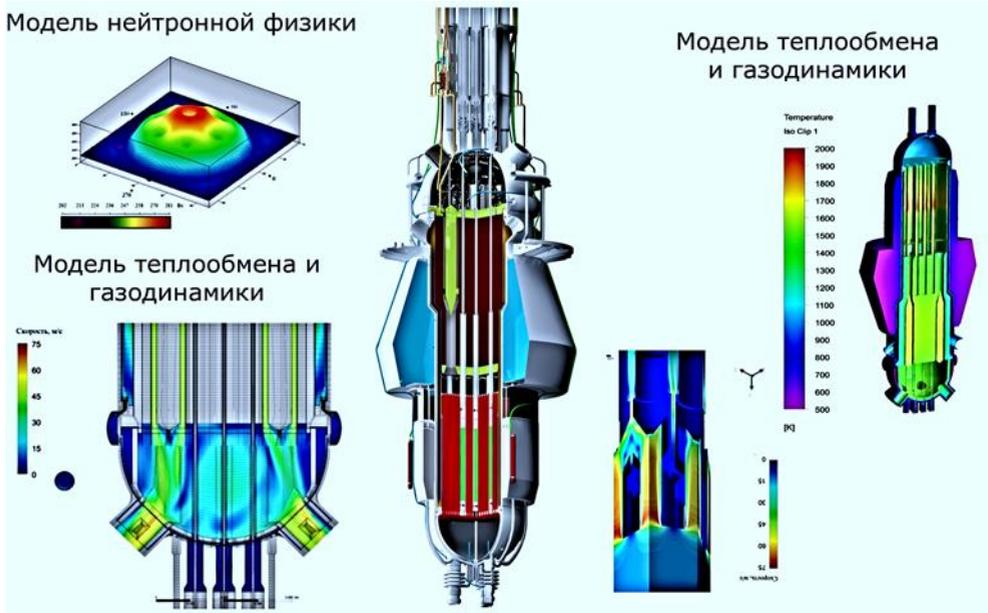


Рис.5. Результаты моделирования нейтронной физики, теплообмена и газодинамики



Рис. 6. Эксперименты, выполненные для верификации расчетных кодов

Комплекс работ, выполненный на стадии разработки технического проекта реакторной установки, позволил перейти к отработке технологии изготовления оборудования, создания и испытания полномасштабных

макетов. Проведены термоциклические и пневматические испытания макета корпуса реактора (рис. 7).

На рис. 8 иллюстрируется процесс сборки фрагмента активной зоны.



Рис. 7. Полномасштабный макет корпуса реактора для термоциклических и пневматических испытаний



Рис. 8. Сборка фрагмента активной зоны

Особое внимание было уделено разработке конструкции, технологии изготовления ТВЭЛ и их испытанию в исследовательских реакторах.

В процессе создания ТВЭЛ усилиями ГНЦ «ФЭИ» и НИИ НПО «ЛУЧ» разработана технология изготовления оболочек ТВЭЛ из монокристалла молибдена с ниобием длиной до 900 мм. ВНИИЭФ разработал, изготовил и испытал блоки радиационной защиты (рис. 9) и регулирующие органы системы управления и защиты (РО СУЗ).

Результаты испытаний подтвердили характеристики, заложенные в проекте. В обоснование работоспособности активной зоны в ПАО «МСЗ» проведены испытания макета фрагмента активной зоны реакторной установки на стойкость к воздействию сейсмических и эксплуатационных нагрузок.



Рис. 9. Блоки внутренней и наружной радиационной защиты

Комплекс ампульных испытаний ТВЭЛ, испытаний полноразмерных ТВЭЛ выполнен в НИИ атомных реакторов и в НИИ реакторных материалов. Послереакторные исследования подтвердили расчетные ресурсные характеристики ТВЭЛ. На рис. 10 иллюстрируются петлевые испытания фрагмента активной зоны.

Завершающими этапами работ о теме были изготовление полномасштабного конструкторско-технологического макета реактора, изготовление по заводской технологии активной зоны с полным комплектом тепловыделяющих элементов. Выполнена контрольная сборка активной зоны и осуществлен контрольный физический пуск с полным объемом исследований [10]. Общий вид критической сборки представлен на рис. 11.

Во время контрольного физического пуска были измерены:
нейтронно-физические характеристики активной зоны;
критическая загрузка активной зоны;
интегральная и дифференциальная эффективность регулирующих органов системы управления и защиты и каждой группы регулирующих органов;

начальный запас реактивности при штатной загрузке и положение регулирующих органов СУЗ его компенсирующее.

Экспериментальные результаты имели хорошее совпадение с расчетами.

Выполненный комплекс НИОКР позволил подтвердить выполнение основных технических требований к реакторной установке, отработать технологию изготовления оборудования реакторной установки, создать производственные комплексы, модернизировать испытательную базу, обеспечить подтверждение основных параметров экспериментальными данными.

Итогом работ стало подтверждение основных технических характеристик реакторной установки, ядерной и радиационной безопасности, подтверждение реализуемости проекта создания реакторной установки.

Одним из основных этапов создания космических ЯЭУ являются ресурсные испытания наземного образца энергоблока. С этой целью сооружается специальный испытательный комплекс [10].

Очень важным результатом работ по программе является подготовка нового поколения создателей техники для космических ядерных установок: конструкторов, исследователей, инженеров. Это означает, что у космической ядерной энергетики есть будущее.

Представленные в настоящем сообщении результаты работ стали важной основой для создания стратегии развития космической ядерной энергетики, разработанной с участием Российской академии наук. Стратегия утверждена Президентом Российской Федерации.

Особо следует отметить выдающийся вклад в развитие космической ядерной энергетики ныне активно работающих ученых академика РАН Н.Н. Пономарева-Степного и академика РАН А.С. Коротеева.

Литература

1. Коротеев А.С. Ядерная энергетика как путь к покорению дальнего космоса – российский опыт и перспективы развития // Тр. международн. конф. «Инновационные проекты и технологии ядерной энергетике (МНТК НИКИЭТ – 2012)», 27–29 ноября 2012 г., Москва.
2. Школьник В.С., Жотабаев Ж.Р., Кадыржанов К.К. и др. Анализ возможности использования стендовой базы НЯЦ РК для возобновления экспериментальных исследований конструкционных элементов и узлов ЯЭДУ // Тр. международн. конф. «Ядерная энергетика в космосе 2005», 1–3 марта 2005 г., Москва – Подольск.
3. Сметанников В.П., Уласевич В.К., Черепнин Ю.С. и др. Реактор ИВГ.1. Опыт и итоги 30-летней эксплуатации // Тр. международн. конф. «Ядерная энергетика в космосе 2005», 1–3 марта 2005 г., Москва – Подольск.
4. Пономарев-Степной Н.Н. История развития ЯРД в СССР // Сборник трудов Третьей Международной конференции «Ядерная энергетика в космосе. Ядерные ракетные двигатели». Подольск, 1993.
5. Демьяненко Ю.Г., Конюхов В.Г., Коротеев А.С. и др. Ядерные ракетные двигатели / Под ред. ак. РАН Коротеева А.С. М.: ООО «Норма-Информ», 2001.
6. Пилотируемая экспедиция на Марс / Под ред. ак. РАН Коротеева А.С. М.: Российская академия космонавтики им. К.Э. Циолковского, 2006. – 320 с.
7. Драгунов Ю.Г., Габараев Б.А., Ромадова Е.Л. Космическая ядерная энергетика: прошлое, настоящее, будущее // Тр. V международн. научно-техн. конф. «Инновационные проекты и технологии ядерной энергетике», 2–5 октября 2018 г., Москва.
8. Драгунов Ю.Г. Разработка реакторной установки для транспортно-энергетического модуля мегаваттного класса // Атомная энергия, 2012, т. 113, вып. 1, с. 4–6.
9. Драгунов Ю.Г. Космическая ядерная энергетика, «Вестник Российской академии наук», 2021, №4.
10. Драгунов Ю.Г., Каплиенко А.В., Ромадова Е.Л. Работы НИКИЭТ по космической ядерной энергетике, «Атомная энергия», 2020, т.129, №4, с.199–204.
11. Dragunov Yu.G., Romadova E.L., Gabaraev B.A. et al. Recommendations on calculation of transport coefficients and thermodynamic properties of helium-xenon gas mixtures and others // Nucl. Engng Des., 2019, v. 354, p. 196.

В.В. Петрунин¹

РЕАКТОРНЫЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ АТОМНЫХ СТАНЦИЙ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Введение

Уникальный научный, конструкторский и производственно-технологический опыт, накопленный в атомной отрасли при создании нескольких поколений реакторных установок (далее – РУ): корабельных – для атомных подводных лодок и надводных кораблей, судовых – для атомных ледоколов, является фундаментальным базисом для развития одного из приоритетных направлений Госкорпорации «Росатом» – созданию атомных станций малой мощности (далее – АСММ), которые обеспечат эффективное решение назревших проблем энергообеспечения и жизнедеятельности удаленных районов как в России, так и за рубежом [1, 2].

В атомных судовых технологиях сформировался российский облик РУ, характерными чертами которого стали предельная компактность, высокая надежность оборудования и показатели безопасности на уровне современных требований для атомной энергетики.

Поскольку уменьшение единичной мощности энергоблока приводит к росту удельных капитальных затрат, именно судовые реакторные технологии позволяют существенно снизить зависимость масштабного фактора на экономические показатели и обеспечить конкурентоспособность АСММ с другими источниками энергии в этом сегменте мощностей.

Ниже представлены результаты создания инновационных РУ типа АБВ, КЛТ, РИТМ, ВБЭР, созданных АО «ОКБМ Африкантов» при тесном сотрудничестве с отраслевой и академической наукой, на базе которых Госкорпорация «Росатом» приступила к реализации программы создания плавучих и наземных АСММ.

Технологическая эволюция судовых РУ

Под технологической эволюцией понимается непрерывный процесс совершенствования конструкции, технологии изготовления, применяемых

¹ Первый заместитель генерального директора-генерального конструктора АО «ОКБМ Африкантов», профессор.

материалов и эксплуатационных характеристик РУ, основанный на сборе и тщательном анализе работы оборудования и систем на всем жизненном цикле. На сегодня этот опыт аккумулирован в создании и эксплуатации около 500 корабельных и судовых РУ, суммарная наработка которых составляет порядка 11000 реакторо-лет, что сравнимо с наработкой всей мировой гражданской атомной энергетики – 12000 реакторо-лет.

Эволюцию судовых РУ можно продемонстрировать на примере выбора компоновочных решений установок для атомных ледоколов, поскольку компоновочная схема РУ имеет принципиальное значение для определения способов и средств обеспечения безопасности, строительных решений, условий эксплуатации и в конечном итоге экономических показателей (рис. 1) [4–6].

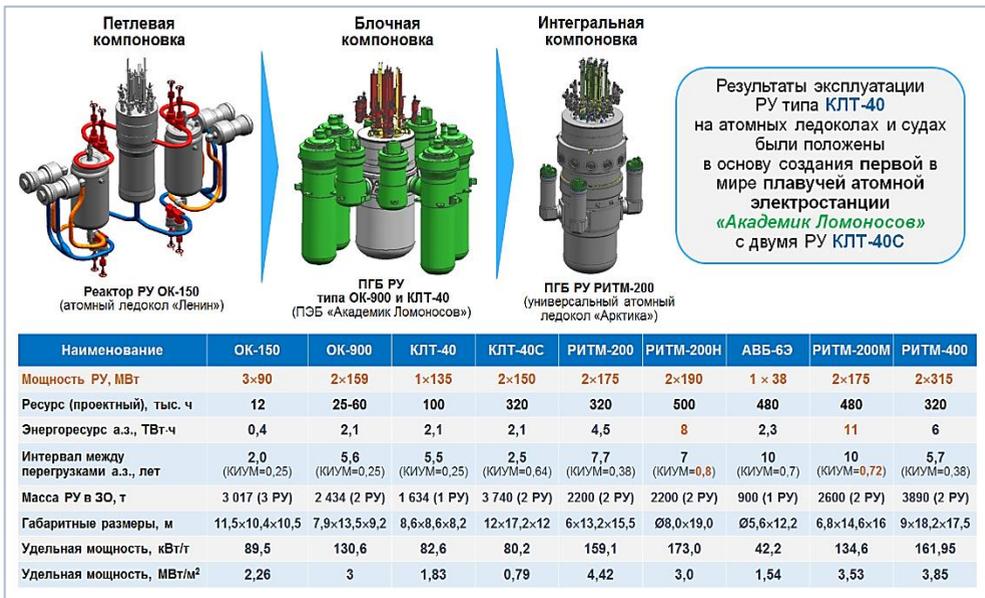


Рис. 1. Технологическая эволюция судовых РУ

Известны три типа компоновочных схем установок: петлевая, блочная, интегральная. Эти схемы приемлемы для всех типов реакторов. Оптимальный выбор в каждом конкретном случае определяется различными факторами, в связи с чем невозможно говорить об универсальных рекомендациях.

Для петлевых РУ характерна значительная пространственная распределенность и большой объем первого контура, наличие трубопроводов

большого диаметра, соединяющих основное оборудование: парогенераторы, насосы, теплообменники, компенсаторы объема и др. Для этой схемы серьезной проблемой является организация защиты при аварийном разрыве трубопроводов первого контура большого диаметра. Большая часть действующих АЭС использует установки ВВЭР и PWR с петлевой схемой. Такая же схема была применена в установке ОК-150 атомного ледокола «Ленин».

Очевидным преимуществом интегральной компоновки (АБВ-6Э, РИТМ-200Н, РИТМ-200М) является локализация теплоносителя первого контура в одном объеме (в корпусе), отсутствие патрубков и трубопроводов большого диаметра, что уменьшает вероятность аварии с большой течью теплоносителя.

С другой стороны, в интегральной компоновке затруднен доступ к оборудованию, размещенному в реакторе, что ограничивает или усложняет ремонтное обслуживание. Поэтому интегральная компоновка предполагает использование высоконадежного оборудования, созданного на основе решений, подтвержденных эксплуатацией, и прошедшего представительную ресурсную проверку в лабораторных условиях.

Блочная компоновка (КЛТ-40С, ВБЭР) занимает, по существу, промежуточное положение между петлевой и интегральной компоновочными схемами. Вместо протяженных трубопроводов первого контура имеются короткие патрубки большого диаметра, соединяющие основное оборудование установки (реактор, парогенератор, насосы).

Блочная компоновка позволяет уменьшить высоту блока и обеспечивает доступность для ремонтного обслуживания. Отсутствие в интегральной и блочной компоновках трубопроводов большого диаметра исключает аварии с большой течью теплоносителя и снижает вероятность тяжелой аварии. Например, в блочной РУ ВБЭР отсутствуют осушение активной зоны, перегрев и разгерметизация оболочек ТВЭЛов в максимальной проектной аварии, имеющих место в установках ВВЭР.

Достигнутые показатели прогресса судовых реакторных технологий от блочной РУ КЛТ-40С к интегральной РУ РИТМ-200 приведены на рис. 2.

Результаты прогресса судовых технологий: габариты РУ уменьшены в ~2 раза, а энергоресурс активной зоны увеличен в ~4 раза.

Наименование параметра	Результат
Назначенный ресурс оборудования до заводского ремонта, тыс. ч	<p>↑ в 1,6 раза (увеличение с 100 тыс. ч до 160 тыс. ч)</p>
Срок службы заменяемого оборудования, лет	<p>↑ в 1,6 раза (увеличение с 12 лет до 20 лет)</p>
Энергоресурс активной зоны, ТВт·ч	<p>↑ до 2-4 раз (увеличение с 2,1 ТВт·ч до 4,5 ТВт·ч для УАП, до 8 ТВт·ч – для АСММ)</p>
Период непрерывной работы, лет	<p>↑ в 3,2 раза (увеличение с 8000 ч (действующие а/п) до 26000 ч)</p>
Масса двух РУ в пределах ЗО, т	<p>↓ в 1,7 раза (уменьшение с 3740 т до 2200 т)</p>
Площадь в пределах ЗО, м ²	<p>↓ в 2,6 раза (уменьшение с 94,8 м² до 36 м²)</p>

ПГБ
РУ действующих
атомных станций



ПГБ РУ РИТМ-200



Рис. 2. Прогресс судовых реакторных технологий: от блочной РУ КЛТ-40С к интегральной РУ РИТМ-200

РУ для плавучих и наземных атомных станций

На основе опыта создания и совершенствования судовых и корабельных реакторов в АО «ОКБМ Африкантов» разработан ряд проектов РУ для автономных атомных энергоисточников малой мощности в диапазоне от 6 до 55 МВт_т: АБВ-6Э, КЛТ-40С, РИТМ-200, РИТМ-200Н, РИТМ-200М, РИТМ-400 [1]. Основные характеристики указанных РУ приведены на рис. 1.

Энергоисточники малой мощности предполагают размещение атомной энергетической установки на суше и на несамходных плавучих средствах.

В проекте РУ малой мощности АБВ-6Э применен интегральный водяной реактор тепловой мощностью 38 МВт с естественной циркуляцией теплоносителя и встроенной системой компенсации давления. Особенностью проекта являются работа без перегрузки в течение 10 лет, пассивные системы безопасности и модульная конструкция энергоблока, обеспечивающие минимальные сроки сооружения [6, 7].

В 2014 г. разработан технический проект плавучего и блочно-транспортного энергоблока на базе РУ АБВ-6Э по контракту с Министерством промышленности и торговли Российской Федерации.

Двухблочная атомная станция с РУ типа АБВ-6 обеспечивает мощность 2×8,5 МВт_т при работе в конденсационном режиме и мощность до 2×6 МВт_т отпуском тепла до 2×12 Гкал/ч при работе в теплофикационном режиме.

Варианты блочно-транспортных энергоблоков для АСММ приведены на рис. 3.

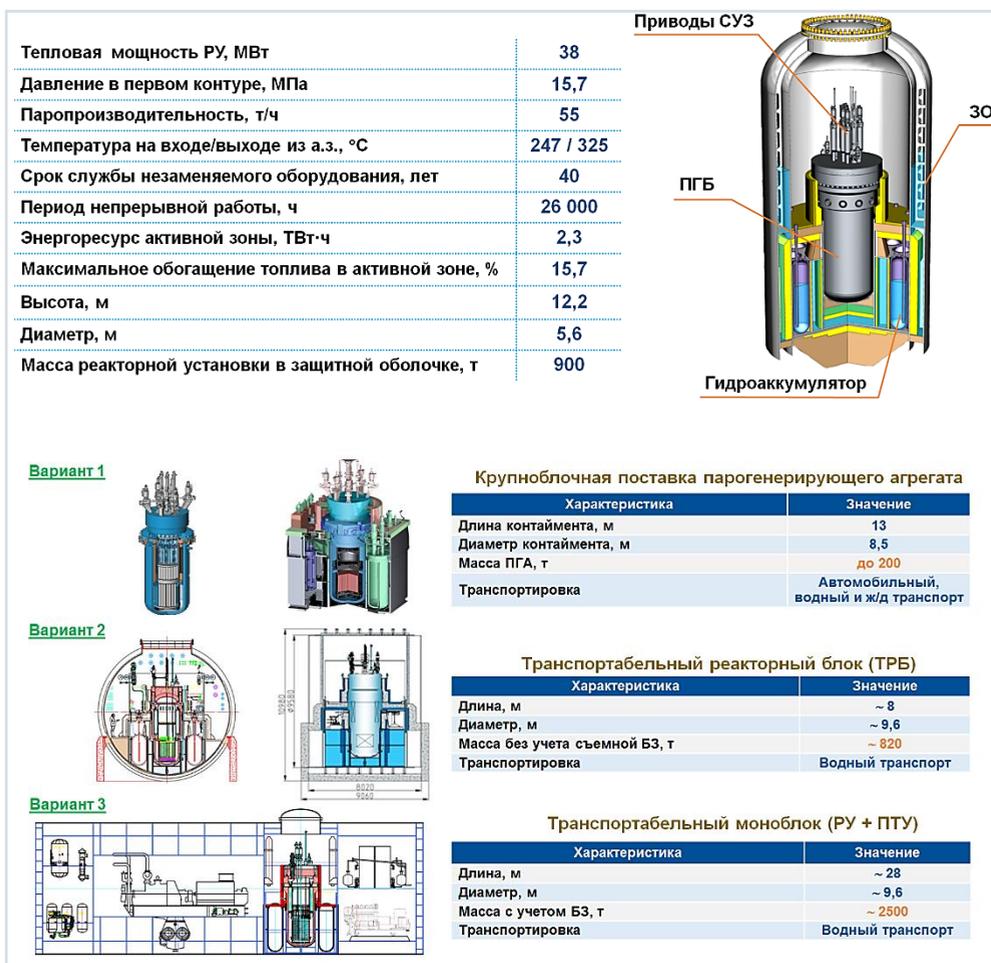


Рис. 3. Варианты блочно-транспортных энергоблоков для АСММ на базе РУ АБВ-6Э

В ноябре 2018 г. осуществлен физический пуск двух реакторов блочного типа КЛТ-40С в составе плавучего энергоблока «Академик Ломоносов» (далее – ПЭБ), а в декабре 2019 г. в городе Певек (Чукотский автономный округ) начала выработку электроэнергии плавучая атомная теплоэлектростанция с ПЭБ «Академик Ломоносов» суммарной электрической мощностью 70 МВт, (рис. 4) [6, 11].

11 февраля 2020 г. в Госкорпорации «Росатом» было подписано Распоряжение о начале реализации пилотного отраслевого проекта «Сооружение атомной станции малой мощности на базе РУ РИТМ-200Н на территории России». Энергетический пуск пилотной АСММ с РУ РИТМ-200Н

запланирован на конец 2027 г. Пилотная АСММ состоит из двух энергоблоков электрической мощностью 2×58 МВт. Общий вид станции приведен на рис. 5.



Рис. 4. ПЭБ «Академик Ломоносов»

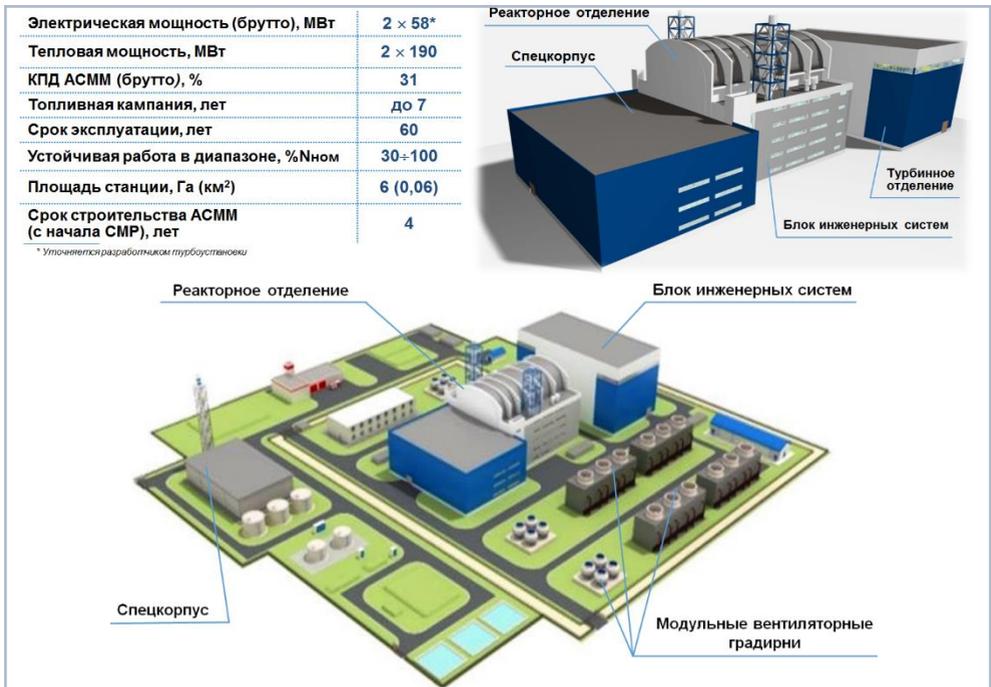


Рис. 5. Общий вид АСММ



Рис. 6. ПГБ РУ РИТМ-200

Ключевой особенностью проекта АСММ является применение РУ интегрального типа РИТМ-200Н [8], прототипом которой является РУ РИТМ-200 (рис. 6) для универсальных атомных ледоколов (далее – УАЛ, рис. 7), имеющей необходимое расчетно-экспериментальное обоснование и изготавливаемой серийно [10].



Рис. 7. УАЛ «Арктика» на базе РУ РИТМ-200

Разработан технический проект РУ РИТМ-400 для уникального атомного ледокола «Лидер» (рис. 8), обеспечивающего круглогодичную навигацию по Северному морскому пути. Согласно Указу Президента РФ от 26.10.2020 г. № 635 утверждена стратегия развития Арктической зоны РФ и обеспечение

национальной безопасности на период до 2035 г., в которой предписано строительство трех атомных ледоколов проекта «Лидер» [10].



Рис. 8. Атомный ледокол «Лидер» на базе РУ РИТМ-400

В перспективе на базе РИТМ-400 возможно создание энергоблоков плавучего и наземного исполнения.

Плавучие атомные станции – мощный фактор стабильности развития регионов, не охваченных единой энергетической системой [11]. Развитием данного направления работ является проект оптимизированного плавучего энергоблока (далее – ОПЭБ) с РУ РИТМ-200М (прототип – РУ РИТМ-200 для УАЛ) с активной зоной, обладающей высоким энергоресурсом и соответствующей международным требованиям по нераспространению ядерных материалов. Завершается разработка материалов эскизного проекта ОПЭБ (рис. 9).

РУ для атомных станций средней мощности

К числу наиболее проработанных для реализации в ближайшей перспективе реакторов средней мощности относятся блочно-модульные реакторные установки типа ВБЭР, разрабатываемые АО «ОКБМ Африкантов» и НИЦ «Курчатовский институт», концепция которых основана на сочетании технологий транспортных атомных паропроизводящих установок с отработанными в гражданской атомной энергетике решениями по активной зоне и топливному циклу [3, 9].



Рис. 9. ОПЭБ на базе РУ РИТМ-200М

Особенностью проекта является применение унифицированной петли теплообмена, являющейся технологической платформой для реализации мощного ряда энергоблоков. На основе базового четырехпетлевого варианта РУ ВБЭР-600 и применения унифицированной петли теплообмена обеспечивается мощной ряд ВБЭР – 600-450-300 МВт (рис. 10).

Процесс создания новых РУ для АСММ сопровождается разработкой и реализацией инновационных технических решений и подходов, направленных на повышение технико-экономических показателей и безопасности станции.

Научно-технические достижения, реализованные в проектах РУ, и дальнейшие задачи

Совершенствование топлива и активных зон

При создании активных зон РУ АСММ (АБВ-6Э, КЛТ-40С, РИТМ-200Н, РИТМ-200М, РИТМ-400) широко используется опыт и результаты эксплуатации активных зон действующих атомных ледоколов, для которых за последние двадцать лет достигнут и подтвержден высокий уровень надежности, радиационно-экологической безопасности и экономичности, в том числе:

- не отмечено ни одного отказа активных зон в пределах назначенного ресурса;
- дозовые нагрузки персонала снижены на два порядка относительно предшествующего периода;
- состояние всех активных зон на момент завершения эксплуатации не выходит за уровень «газовой неплотности»;
- на базе данных эксплуатации 20 активных зон (~ 25 тыс. ТВЭЛов) практически обеспечен «нулевой уровень отказа».

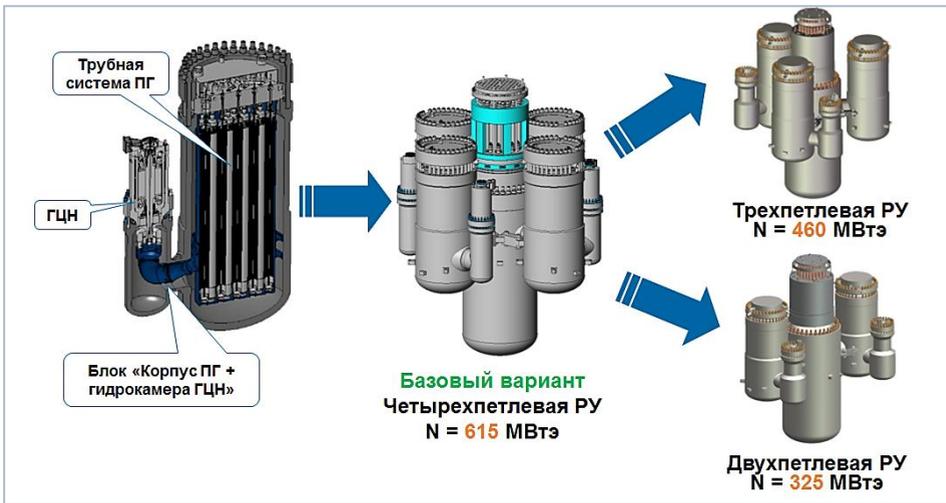


Рис. 10. Мощностей ряд ВБЭР

Данные показатели достигнуты в условиях жестких маневренных режимов атомных ледоколов, существенно отличающихся от режимов эксплуатации топлива ВВЭР, что обуславливает особенности конструкции и технологии изготовления ТВЭЛов транспортных установок.

Работы по активным зонам ведутся в части увеличения энергоресурса до 8–11 ТВт·ч, совершенствования топливной композиции и материалов оболочек твэлов, элементной базы активной зоны – ТВЭЛов, СВП, ПЭЛ и стержней АЗ – с проведением необходимого комплекса НИОКР и верификацией, аттестацией кодов нейтронно-физических расчетов и теплогидравлических кодов (рис. 11).

Конструкция ТВС активной зоны ВБЭР-600 разработана на базе конструкции ТВСА и ее модификаций в активных зонах РУ ВВЭР-1000.



Рис. 11. Характеристики активных зон УАЛ, ПЭБ, ОПЭБ и АСММ

В ТВС ВБЭР-600 применены технические решения и конструктивные элементы, апробированные опытом эксплуатации ТВСА, ТВСА-12, ТВСА-PLUS, ТВСА-АЛЬФА, ТВСА-5М.

Данная конструкция обеспечивает геометрическую стабильность ТВС и, соответственно, стабильность теплофизических и нейтронно-физических характеристик активной зоны, а также исключает заклинивание ПЭЛ РО СУЗ в направляющих каналах, что, в свою очередь, позволяет обеспечить надежность и безопасность активной зоны в процессе эксплуатации.

Для обоснования работоспособности конструкции ТВС ВБЭР-600 и подтверждения ее концепции использованы результаты комплекса дореакторных прочностных, вибрационных, теплофизических и гидравлических испытаний фрагментов и полномасштабных макетов ТВСА на стендах АО «ОКБМ Африкантов», АО «МСЗ».

Работоспособность конструкции ТВСА, ее устойчивость к формоизменению подтверждена опытом успешной эксплуатации на Калининской АЭС, АЭС Украины и Болгарии.

В РУ ВБЭР исключена опасность парациркониевой реакции в сценарии максимальной проектной аварии и, соответственно, необходимость применения в активной зоне материалов, не склонных к пароводяной реакции («толерантное» топливо). Данное качество установок ВБЭР существенно повышает их технико-экономическую привлекательность и с учетом

прогнозируемой продолжительности НИОКР по толерантному топливу (10 лет) обуславливает возможность реализации в ближайшее время.

Инновационные пассивные системы безопасности

Концепция безопасности включает:

1. Предотвращение нарушений нормальной эксплуатации.

Разработка проекта на основе консервативного подхода с применением апробированных технических решений, развитые свойства внутренней самозащищенности (отрицательные обратные связи по реактивности, интегральная компоновка, высокая теплоаккумулирующая способность, сужающие устройства, верхнее подключение трубопроводов).

2. Предотвращение проектных аварий.

Своевременное выявление отклонений от нормальной эксплуатации и их устранение, управление при эксплуатации с отклонениями (структура и алгоритмы систем управления, резервирование оборудования нормальной эксплуатации).

3. Применение активных и пассивных систем безопасности.

При работе активных систем в авариях с разгерметизацией первого контура в течение первых суток температура снижается ниже 100°C – истечение прекращается. При работе пассивных систем при герметичном первом контуре время работы систем не ограничено, в авариях с разгерметизацией первого контура – более 72 часов.

4. Управление запроектными авариями.

Использование специальных технических средств (система аварийного охлаждения активной зоны с гидроаккумуляторами, пассивная система отвода остаточных тепловыделений, система заполнения кессона реактора водой) для управления запроектными авариями и самосрабатывающих устройств.

Ограничение последствий запроектных аварий (удержание расплава активной зоны в корпусе реактора, исключение образования критмасс при плавлении, исключение образования водорода, снижение аварийного давления в защитной оболочке).

Критерии и целевые ориентиры безопасности АСММ:

– санитарно-защитная зона в пределах площадки АСММ;

– дозовая нагрузка на население при нормальной эксплуатации – менее 0,01% от естественного фона;

– суммарная вероятность тяжелых аварий не превышает 10^{-6} на реактор в 1 год (согласно НД – 10^{-5});

– суммарная вероятность большого аварийного выброса, при котором необходимо выполнение мер защиты населения, не превышает 10^{-7} на реактор в 1 год (согласно НД – 10^{-7}).

Основные параметры обеспечения безопасности РУ КЛТ-40С и РУ РИТМ-200Н приведены в табл. 1.

Таблица 1

Основные параметры обеспечения безопасности РУ КЛТ-40С
и РУ РИТМ-200Н

Характеристика	РУ КЛТ-40С ПЭБ	РУ РИТМ-200Н АСММ
Обеспечение расхолаживания при полном обесточивании (при герметичном первом контуре)	24 часа	Без ограничений
Резерв времени до начала осушения активной зоны при аварии типа LOCA с обесточиванием	2 часа	Без ограничений
Конструктивная особенность ПГБ – продолжительность подпитки при авариях типа LOCA	4 месяца	Менее 1 суток

Целями исследований инновационных пассивных систем безопасности являются:

– обеспечение высокого уровня ядерной безопасности АСММ при авариях с полным обесточиванием, включая аварии LOCA и тяжелую аварию;

– обеспечение функционирования без ограничений по длительности работы и без необходимости вмешательства персонала;

– исключение тяжелой аварии при аварии LOCA с наложением полного обесточивания продолжительностью не менее 72 часов («Фукусимский» сценарий) без управляющих мероприятий и использования внешних источников энергии;

– выполнение функций как аварийной, так и нормальной эксплуатации, упрощение структуры и состава систем безопасности;

– обеспечение высокой отказоустойчивости пассивных систем за счет независимости и резервирования работы оборудования.

В комплексе такими свойствами в настоящее время не обладает ни одна из существующих систем, используемых в ядерной энергетике.

Создание такой системы придаст РУ свойства повышенной безопасности и обеспечит «практический уход» от тяжелых аварий.

Увеличение ресурса оборудования РУ

В настоящее время проектный срок службы действующих РУ атомных ледоколов составляет 30 лет. Увеличение срока службы незаменимого оборудования до 40 лет и более (до 60 лет) с соответствующим увеличением срока службы заменяемого оборудования позволяет существенно улучшить экономические показатели АСММ.

В настоящее время для этого есть все основания из опыта эксплуатации атомных ледоколов:

- корпус реактора: достигнуто – 33 года, наработка 182 000 ч, при флюенсе $4,5 \times 10^{20}$ нейтрон/см²;
- парогенератор: достигнуто – 33 года, наработка 177 000 ч;
- ЦНПК: достигнуто – 33 года, наработка 185 470 ч;
- приводы СУЗ: достигнуто – 33 года, наработка 182 000 ч.

Сегодня в АО «ОКБМ Африкантов» выполняются НИОКР для обоснования повышения назначенных ресурсных характеристик основного оборудования АСММ с РУ РИТМ-200 при сроке службы РУ – 60 лет.

Для обоснования применяется технология численного эксперимента (взамен физического) на основе цифровых двойников оборудования.

Ресурсные характеристики оборудования обосновываются таким образом, чтобы их применение в индивидуальных проектах различных АСММ не требовало изменений основных концептуальных, конструктивных и компоновочных решений.

Технологии математического моделирования на суперЭВМ и создание цифровых двойников

Создание перспективных РУ малой и средней мощности требует нового подхода к расчетному обоснованию проектов, внедрения современных средств цифровизации, комплексных систем компьютерного проектирования, расчетного анализа и обоснования, подготовки производства.

С этой целью в АО «ОКБМ Африкантов» разработана технология суперкомпьютерного двойника ЯЭУ различного назначения (рис. 12).

Суперкомпьютерный двойник ЯЭУ может быть использован на всех этапах жизненного цикла изделия и позволяет:

- повысить качество и безопасность вновь разрабатываемых проектов;

- сократить количество дорогостоящих испытаний;
- сократить сроки и стоимость проектирования новых объектов.

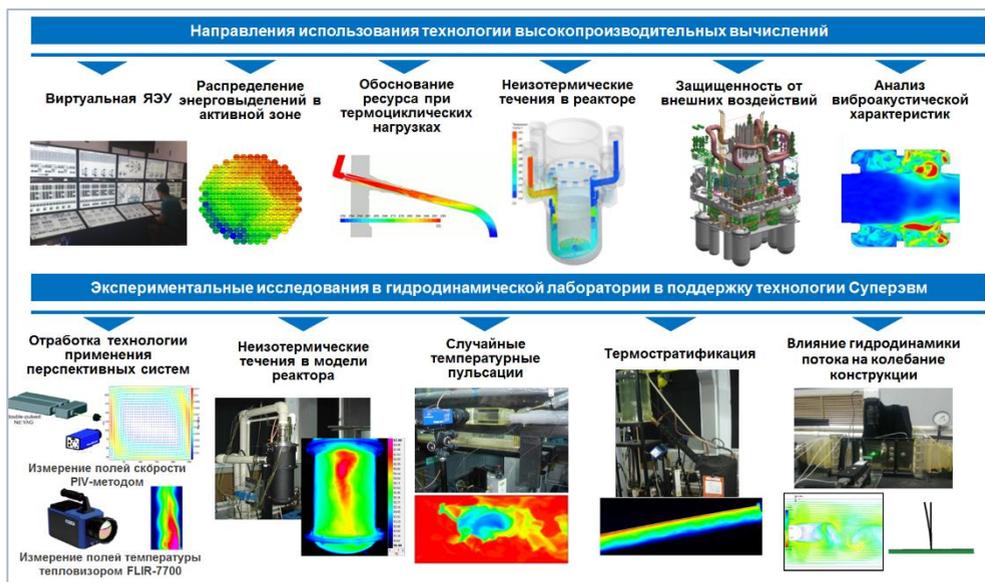


Рис. 12. Суперкомпьютерные технологии как ключевой фактор развития научно-технического обоснования проектов

Анализ конкурентоспособности и масштабы реализации АСММ

Маркетинговые исследования, проведенные АО «РАОС», показывают, что потенциальный объем доступного мирового рынка для АСММ (наземного исполнения) в базовом варианте оценивается от 20,3 ГВт до 83,0 ГВт в оптимистическом сценарии.

Объем доступного мирового рынка ОПЭБ в базовом варианте оценивается в 4,1 ГВт.

Объем доступного рынка электроэнергии связан с показателем LCOE (полная удельная стоимость производства единицы электрической энергии) энергоисточника следующим образом:

Показатель	Сценарий 1	Сценарий 2
Целевой показатель LCOE, \$/МВт·ч	90	110
Доступный рынок, ГВт	23	10
Объем рынка двухблочных АСММ на базе РУ РИТМ-200Н, шт.	~ 230	~ 100

Анализ конкурентоспособности АСММ с различными источниками генерации аналогичной мощности (углеводородное топливо, солнечная и ветровая энергетика, энергия приливов) показал, что для уверенного вхождения на рынок малых мощностей для АСММ должен быть обеспечен целевой LCOE не выше 90 \$/МВт·ч (5400 руб./МВт·ч) при ставке дисконтирования 7%.

Таблица 2

Экономические показатели АСММ на базе РУ РИТМ-200Н,
РИТМ-400, ОПЭБ на базе РУ РИТМ-200М

Наименование параметра	РУ РИТМ-200Н АСММ	РУ РИТМ-200М ОПЭБ	РУ РИТМ-400 АСММ
Мощность тепловая/ электрическая, МВт	165 / 50÷55	175 / 50÷55	350 / 90÷100
Обогащение UO ₂ , %	19,7	19,7	–
Кампания топлива, эфф. сут.	2 020	2 620	795
Масса и габариты РУ	2 020 т (на 2 РУ) 6×13,2×15,5	2 600 т (на 2 РУ) 6,8×14,6×16	3 890 т (на 2 РУ) 9×18,2×17,5
Удельные капитальные затраты без НДС, \$/кВт _э (в ценах на 01.01.2020 г. без учета стоимости а.з.)	АСММ 6 400* (для площадки Билибино)	ОПЭБ 4 300** БГТС ~ 800*** Итого Σ = 5 100	АСММ 5 400÷5 800
Срок создания головной РУ, лет	4 (серийная РУ – 3)	3÷3,5 (серийная РУ – 3)	5 (серийная РУ – 3)
Срок сооружения АСММ, ОПЭБ, лет	6,5÷7	7,5÷8	8
Срок службы, лет	60	60	60
LCOE, цент/кВт·ч (в ценах на 01.01.2020 г. при d = 7%, КИУМ = 0,8)	14,2 12,6 (при КИУМ=0,9)	13,4	10,9÷11,8 (концептуальные оценки)

*Исходные данные (ИД) АО РАОС.

**ИД ПАО «ЦКБ «Айсберг».

***ИД АО «Атомэнерго».

На данный момент технико-экономические показатели АСММ на базе РУ РИТМ-200Н, РИТМ-400 и ОПЭБ на базе РУ РИТМ-200М оцениваются от 10 до 14 цент/кВт·ч в зависимости от КИУМ (табл. 2), продолжается дальнейшая оптимизация проектов.

Следует отметить, что при сравнении АСММ с потенциальными конкурентами проект РУ РИТМ-200 обладает существенными

преимуществами по референтности, топливу, маневренным характеристикам (табл. 3) [3].

Таблица 3
Сравнение АСММ на базе РУ РИТМ-200Н с потенциальными конкурентами

Критерии	РИТМ-200	АСР-100 (КНР)	АСР50S (КНР)	SMART (Корея)	NuScale (США)
Тип реактора	ВВР интегрального типа	PWR интегрального типа	PWR блочного типа	PWR интегрального типа	PWR интегрального типа
Мощность, Nт/№, МВт	190 / 58	385 / 125	200 / 50	330 / 100	160 / 50
Стадия разработки	РКД, серийное изготовление для УАЛ	Basic design (технический проект)	Preliminary design	Certified (одобренный типовой проект)	На рассмотрении национального регулятора
Референтность	Опыт эксплуатации судовых РУ	Отсутствует	Отсутствует	Отсутствует	Отсутствует
Безопасность	Активные и пассивные системы безопасности + самосрабатывающие устройства	Пассивные систем безопасности	Пассивные системы безопасности	Активные и пассивные системы безопасности	Пассивные системы безопасности
	Время функционирования пассивных систем безопасности не менее 72 часов				
Проектный срок службы, лет	60 лет – корпус реактора 20 лет – ПГ	60 лет – корпус реактора ПГ – данные отсутствуют	40 лет – корпус реактора ПГ – данные отсутствуют	60 лет – корпус реактора 15 лет – ПГ	40 лет – корпус реактора ПГ – данные отсутствуют
Топливо	UO ₂ в силуминовой матрице, 42XHM, обогащение < 20%; гексагональные ТВС 199 шт.; кампания а.з. 2000 эфф. сут. (6 лет)	UO ₂ , циркониевые сплавы, обогащение < 4,95 %; квадратные ТВС 17×17, 57 шт.; кампания а.з. 730 эфф. сут. (2 года)	UO ₂ , циркониевые сплавы, обогащение < 4,95 %; квадратные ТВС 17×17, 57 шт.; кампания а.з. 915 эфф. сут. (2,5 года)	UO ₂ , обогащение < 4,95 %; квадратные ТВС 17×17, 57 шт.; кампания а.з. 990 эфф. сут. (3 года)	UO ₂ , обогащение < 4,95 %; квадратные ТВС 17×17, 37 шт.; кампания а.з. 730 эфф. сут. (2 года)
Габариты ПГБ, В × Д, м	8,5 × 3,3	10 × 3,35	7,2 × 2,2 (реактор блока)	18,5 × 6,5	17,8 × 3
Маневренность	Топливо обеспечивает маневренные режимы 10÷100% со скоростью 6% Nном/мин.	Используемое топливо ограничивает возможности маневрирования (опыт PWR)			

В ближайшей перспективе, согласно стратегии развития УАЛ, АСММ, ОПЭБ до 2030 г., предусмотрено изготовление ~ 20 РУ серии РИТМ:

- 4 РУ для 4,5-УАЛ (2024 и 2025 гг.);
 - 6 РУ для 3-х атомных ледоколов «Лидер» (2028 г., 2030 и 2035 гг.);
- для АСММ, ОПЭБ:

- 2 РУ для пилотной АСММ в Якутии (2027 г.);
- 16 РУ для ОПЭБ «Энергофлот» (2 РУ – 2028 г., далее по 2 РУ каждый год) или 10 РУ для ОПЭБ «Баимский ГОК» (2 РУ – 2026 г., далее по РУ каждый год).

Заключение

В проектах инновационных РУ для атомных энергоисточников малой и средней мощности типа АБВ, КЛТ, РИТМ, ВБЭР реализован уникальный научно-технический и производственный потенциал ядерных судовых технологий для решения актуальных задач атомной энергетики – создание наземных и плавучих энергоблоков с небольшими сроками реализации и конкурентоспособными технико-экономическими показателями.

Разработанный мощностной ряд РУ позволяет на базе унифицированных проектов создавать атомные станции для широкого круга потребителей как внутри России, так и за рубежом, а маркетинговые исследования рынка показывают большую востребованность данного типа энергоисточников.

Несмотря на большой опыт создания и эксплуатации судовых и корабельных РУ, имеется комплекс научно-технических задач, решение которых конструкторским и научным сообществом позволит достичь еще более уникальных результатов с целью обеспечения потребительских качеств АСММ. К числу таких научно-технических задач следует отнести:

- достижение срока службы всего оборудования РУ на уровне 60 лет и более за счет создания и применения новых материалов, исследование влияния пульсаций температур на прочностные характеристики, создание виртуального математического моделирования работы оборудования в соответствии с моделью эксплуатации на всем жизненном цикле;

- обеспечение показателей безопасности АСММ на уровне требований к РУ четвертого поколения за счет создания уникальных пассивных систем безопасности, обеспечивающих расхолаживание в тяжелых авариях неограниченное время; исключение плавления топлива в активной зоне и образования водорода;

- совершенствование конструкции активных зон и топлива с целью увеличения энергозапаса, обеспечивающего работу РУ 10 лет и более без перегрузки топлива; дальнейшее повышение выгорания топлива; применение материалов, исключаящих пароциркониевую реакцию в тяжелых авариях («толерантное» топливо);

- применение технологий суперЭВМ и создание цифровых двойников;

- проведение комплекса уникальных экспериментов для верификации CFD-кодов;

– исследование аварийных режимов с учетом тонких эффектов по стратификации теплоносителя и конвективной диффузии.

Список литературы

1. Атомные станции малой мощности: новое направление развития энергетики/ под редакцией академика РАН А.А. Саркисова. – М: Наука, 2011. – 375 с.

2. Малая атомная энергетика в контексте трансформации электроэнергетических систем/ А.А. Саркисов, С.В. Антипов, Д.О. Смоленцев и др. // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2020, №4. С. 5–14.

3. Атомные станции малой мощности: новое направление развития науки/ Том 2 / под редакцией академика РАН А.А. Саркисова. – М: Академ-Принт, 2015. – 387 с.

4. Проекты атомных станций малой и средней мощности, направления их технико-экономической оптимизации / В.В. Петрунин, Ю.П. Фадеев, Л.В. Гуреева, С.Е. Скородумов // Атомные станции малой мощности: новое направление развития энергетики/под редакцией академика РАН А.А. Саркисова. – М: Наука, 2011. С. 182–186.

5. Перспективы развития атомных станций с реакторами малой и средней мощности / В.В. Петрунин, Л.В. Гуреева, Ю.П. Фадеев, И.В. Шмелев, А.Н. Лепехин, С.В. Удалищев // Атомные станции малой мощности: новое направление развития науки / Том 2 / под редакцией академика РАН А.А. Саркисова. – М: Академ-Принт, 2015. – С. 36–49.

6. Advances in Small Modular Reactor Technology Developments. A Supplement to: IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS). 2018. Edition.

7. АСММ в плавучем и блочно-транспортном исполнении для энергообеспечения регионов арктической зоны/ Ю.П. Фадеев, А.Н. Пахомов, В.И. Полуничев, А.Ю. Турусов // Сборник докладов третьей международной научно-технической конференции: доклады. – М.: ОАО «НИКИЭТ», 2014, т. 2. С. 85–91.

8. Обликовый проект АСММ с РУ РИТМ-200/ В.В. Петрунин, Ю.П. Фадеев, А.Н. Пахомов, К.Б. Вешняков, В.И. Полуничев, И.Е. Шаманин// Атомная энергия/ Т.125. Декабрь 2018, вып. 6. С. 323–327.

9. Реакторная установка ВБЭР-600 для энергоблоков средней мощности. Основные схемно-конструктивные решения и характеристики// А.Е. Арефьев, А.В. Кураченков, В.В. Петрунин, Ю.П. Фадеев// Материалы Десятой Международной научно-технической конференции «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики, 2016.

10. Реакторные установки для атомных ледоколов. Опыт создания и современное состояние/ Д.Л. Зверев, Ю.П. Фадеев, А.Н. Пахомов, В.Ю. Галицких и др.// Атомная энергия/ Т. 129. 2020, вып. 1. С. 29–37.

11. Опыт создания первой в мире плавучей АЭС. Направления дальнейшего развития/ В.М. Беляев, М.А. Большухин, А.Н. Пахомов, А.М. Хизбуллин и др. // Атомная энергия/ Т. 129. 2020, вып. 1. С. 37–43.

С.Н. Лебедев¹, Б.Н. Четверушкин², Р.М. Шагалеев³

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

Вычислительные и информационные технологии оказывали, оказывают и будут оказывать существенное влияние на развитие атомной отрасли. Еще в конце 40-х годов прошлого века было создано несколько групп, в задачу которых входило проведение расчетных работ, связанных с созданием атомного и термоядерного оружия.

Эти работы проводились в Математическом институте АН СССР (М.В. Келдыш, И.М. Гельфанд, А.А. Дородницын, Д.Е. Охоцимский, К.А. Семендяев.), Геофизическом институте АН СССР (А.Н. Тихонов, А.А. Самарский), КБ-11 (Саров) (Н.Н. Боголюбов, В.С. Владимиров), Лаборатории измерительных приборов АН СССР (в настоящее время НИЦ «Курчатовский институт») (С.Л. Соболев), Институте физических проблем АН СССР (И.М. Халатников, Н.С. Мейман), Лаборатории «В» (Обнинск) (Д.С. Блохинцев, Г.И. Марчук), Ленинградском отделении Математического института АН СССР (Л.В. Канторович).

Первоначально, до появления первых ЭВМ, расчёты велись на трофейных немецких электромеханических арифмометрах «Мерседес». Результаты расчётов на каждом арифмометре, которые, как правило, проводили молодые выпускники технических вузов, передавались для продолжения на соседние арифмометры. По сути дела, этот процесс стал прообразом современных параллельных вычислений.

Сейчас, по прошествии многих лет, трудно сказать – насколько данные расчеты ускорили создание того или иного изделия, помогли ли найти наиболее оптимальное решение. Однако список математиков, удостоенных за эти работы высокого звания Героя Социалистического Труда, позволяет судить о важности полученных результатов. Этого звания были удостоены академики М.В. Келдыш, А.Н. Тихонов, Н.Н. Боголюбов, Д.С. Блохинцев,

¹ Начальник отдела РФЯЦ-ВНИИТФ им. ак. Е.И. Забабахина, член-корреспондент РАН.

² Научный руководитель ФИЦ ИПМ им М.В. Келдыша РАН, академик РАН.

³ Заместитель директора РФЯЦ-ВНИИЭФ, заместитель научного руководителя РФЯЦ-ВНИИЭФ, доктор физико-математических наук.

С.Л. Соболев, А.А. Самарский, Г.И. Марчук, А.А. Дородницын, В.С. Владимирив, Д.Е. Охоцимский, Н.Н. Яненко.

Помимо решения конкретных задач по укреплению обороноспособности, в результате этих работ в кратчайшие сроки (5–7 лет) были созданы основы современной прикладной математики. По сути дела, программирования, как основы информационных технологий, до этих работ не существовало. Следует отметить, что большинство результатов в силу закрытого характера выполняемых работ были получены независимо учеными СССР и США.

На первом этапе развития атомной отрасли была заложена методология математического моделирования, позволяющая получать предсказательные результаты для сложных технических систем. При этом сами модели, позволяющие получать конкретные результаты на доступных вычислительных средствах, уточнялись в процессе расчетов с помощью сопоставления данных вычислительных и натуральных экспериментов, а также теоретических рассуждений [1].

Ещё одним результатом этих работ явилось создание мощных коллективов специалистов в области прикладной математики и программирования, способных решать важные народно-хозяйственные задачи. В настоящее время это относится в первую очередь к РФЯЦ-ВНИИЭФ, РФЯЦ-ВНИИТФ, а также институтам, находящимся под научно-методическим руководством РАН. В частности, во РФЯЦ-ВНИИЭФ создан и продолжает совершенствоваться современный пакет прикладных программ «Логос», направленный на решение задач машиностроения, авиационной промышленности, добычи углеводородного сырья и других промышленных проблем. Этот пакет составляет успешную конкуренцию аналогичному зарубежному программному продукту, ранее доминировавшему на отечественном рынке.

Одной из фундаментальных научных и технологических проблем, стоящих перед человечеством, является овладение термоядерной энергией. Перспективным направлением этих исследований является лазерный термоядерный синтез (ЛТС), идею которого в 1964 году высказали советские ученые академики Н.Г. Басов и О.Н. Крохин. Суть этой идеи заключается в нагреве небольшой сферической капли смеси дейтерия и трития мощным короткодействующим лазерным импульсом. При этом нагретая до высоких температур оболочка разлетается, а внутрь капли идет ударная волна,

сжимающая в центре вещество. В таком высокоплотном веществе создаются благоприятные условия для осуществления термоядерной реакции в масштабах, приемлемых для промышленной реализации. Проблемы, возникающие при математическом моделировании этой задачи, характерны и для ряда других направлений, стоящих перед атомной отраслью. Поэтому рассмотрим их подробнее.

На рис. 1 изображено развитие неустойчивостей в термоядерной мишени. Они существенно влияют на сферичность сжатия и саму возможность осуществления термоядерной реакции.

Этим неустойчивостям свойственны различные пространственные масштабы и для их адекватного описания необходимы подробные пространственные сетки, состоящие из 10^9 – 10^{12} пространственных узлов.

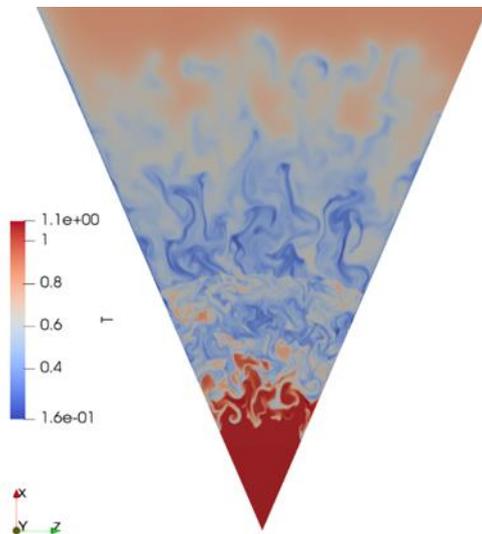


Рис. 1. Лазерный термоядерный синтез
– пример моделирования в двумерной постановке

Расчёты в такой постановке требуют применения вычислительных систем сверхвысокой производительности с одновременным использованием большого количества независимых вычислителей (процессоров, ядер). К сожалению, адаптация алгоритмов на архитектуру систем с экстремальным параллелизмом сталкивается с серьёзными трудностями. Для их преодоления нужны логически простые и в то же время эффективные алгоритмы. Это серьёзная фундаментальная проблема вычислительной

математики. На её решение направлены усилия ученых и специалистов ведущих мировых держав.

Одним из возможных приёмов увеличения эффективности расчётов является сгущение пространственных сеток в областях больших градиентов интересующих параметров.

На рис. 2 изображен фрагмент динамически сгущающейся сетки.

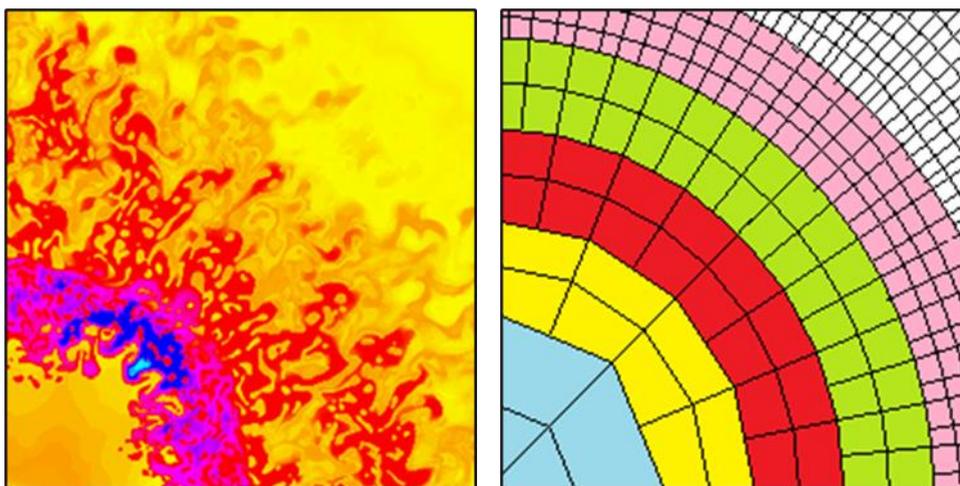


Рис. 2. Динамически адаптивная сетка

Полученная таким образом сетка является неструктурированной и помимо ранее упомянутой проблемы и создания алгоритмов, адаптируемых к архитектуре систем с массивным параллелизмом, здесь дополнительно возникает трудность, характерная для неструктурированных сеток, которая связана с равномерной загрузкой процессоров.

Кроме того, при построении адаптивных сеток следует уделять особое внимание выполнению законов сохранения для основных газодинамических величин. Работы, связанные с моделированием задач ЛТС на высокопроизводительных вычислительных системах, активно ведутся коллективами ИПМ им М.В. Келдыша РАН, РФЯЦ-ВНИИЭФ, РФЯЦ-ВНИИТФ.

Перспективным направлением ЛТС является сжатие рабочего вещества рентгеновским излучением, которое, в свою очередь, формируется при взаимодействии лазерного излучения с мишенью на основе тяжёлых металлов. Дополнительная вычислительная трудность здесь связана с необходимостью

моделирования теплового излучения. Уравнение, описывающее поле теплового излучения, помимо пространственных переменных дополнительно зависит от частоты и направления полёта фотонов. Как показывают оценки, адекватное моделирование этого направления ЛТС требует применения вычислительных систем эксафлопсного класса [2, 3].

Ядерная энергетика активно использует методы математического моделирования как эффективный инструмент своего развития. Здесь приходится решать многомерные интегро-дифференциальные уравнения переноса нейтронов с учетом сложной геометрии реактора. Кроме того, серьёзные трудности вызывает моделирование теплогидравлики реактора.

Особый интерес вызывает моделирование различных сценариев аварии на АЭС, а также распространения радиоактивных загрязнений в различных средах. При этом, так же как и при моделировании ЛТС, приходится сталкиваться с проблемами адаптации вычислительных алгоритмов к архитектуре систем с экстремальным параллелизмом, генерации неструктурированных сеток, использовании динамически адаптивных сеток и других современных высокопроизводительных вычислительных технологий.

Важным направлением исследований является изучение радиационной стойкости материалов. Здесь основным инструментом моделирования являются методы молекулярной динамики. В рамках этого направления для каждой частицы вещества решаются обыкновенные дифференциальные уравнения:

$$m_i \frac{d^2 \vec{r}_i}{dt^2} = F_i,$$

где m_i и r_i – соответственно масса и координата i -й частицы, F_i – сила, определяемая потенциалом взаимодействия частиц.

В этом случае вычислительные проблемы определяются по меньшей мере двумя факторами: во-первых, большим числом (10^9 и выше) частиц, используемых при моделировании, а во-вторых, необходимостью обеспечения равномерной загрузки процессоров, учитывающей постоянно меняющуюся концентрацию частиц в той или иной области пространства.

Естественно, что алгоритмы молекулярной динамики не являются единственным инструментом для изучения свойств материалов. Одним из направлений исследований здесь является применение технологий искусственного интеллекта. Входными данными, используемыми нейросетями для получения интересующей информацией, наряду с

разнообразными результатами натуральных экспериментов могут служить результаты моделирования с помощью методов молекулярной динамики.

Важной составляющей частью вычислительных и информационных технологий является визуализация данных моделирования. Для высокопроизводительных вычислений здесь актуальными представляются сжатие данных при построении визуализационных картин, построение изоповерхностей при аппроксимации на неструктурированных сетках. Определённые трудности возникают при визуализации процессов в заранее не фиксированной пространственно-временной локализации.

Перейдём к описанию других информационных технологий, актуальных для развития атомной отрасли.

Проблема оценки рисков и парирования непредвиденных ситуаций приобретает для атомной отрасли особую остроту в связи с крайне негативными последствиями техногенных катастроф [4, 5]. Здесь важное значение приобретает многофакторный анализ, позволяющий выяснить влияние различных причин на возможность реализации неблагоприятного сценария. При этом особую роль играет машинное обучение, позволяющее выдать рекомендации в случае возникновения критической ситуации. В этом случае, так же как и при исследовании свойств материалов, важное значение имеет наличие достаточно большого количества виртуальных сценариев возможных техногенных катастроф, полученных с использованием методов математического моделирования. При этом само моделирование возможно только с помощью высокопроизводительных систем и соответствующих вычислительных технологий.

Направление «умный реактор», так же как и другие аналогичные направления, например, «умная домна», «умная скважина», ориентировано на применение технологий искусственного интеллекта для повышения эффективности работы этих сложных технических устройств. Технологии искусственного интеллекта могут применяться для планирования работы АЭС. Строительство такого дорогостоящего объекта зависит от ритмичной работы многих производств. При этом следует учитывать необходимость создания производств и потребности будущих потребителей электроэнергии, вырабатываемой строящимися АЭС. Большой объём факторов, влияющих на этот процесс, требует для их учета привлечения вычислительных систем высокой производительности.

Важным является также решение проблемы информационной безопасности, которая является актуальной не только для атомной отрасли, но и для сферы финансов, управления и других направлений современной деловой и производственной деятельности. Здесь одним из основных направлений является выявление «окон уязвимости».

В заключение отметим, что в данном разделе книги приведены далеко не все направления, в которых применение компьютерных технологий даёт существенный положительный эффект в деятельности атомной отрасли. Эта отрасль была, есть и будет наиболее квалифицированным и требовательным потребителем достижений в области информационных технологий, прикладной математики и математического моделирования.

Как и на заре своего существования, потребности развития атомной отрасли являются мощным стимулом для создания новых алгоритмов и информационных технологий, совершенствования методологии математического моделирования, которое невозможно без оснащения коллективов, ведущих эти работы, современной высокопроизводительной вычислительной техникой.

Необходимо также поддерживать и усиливать взаимодействие между научными институтами Росатома и институтами, находящимися под научно-методическим руководством РАН.

Литература

1. Четверушкин Б.Н. Суперкомпьютерные технологии: проблемы и перспективы ближайшего будущего // Вестник РАН. 2018, т. 88, № 12, с. 1083–1089.
2. Ватулин В.В., Волкова К.А., Кибкало А.А., Певная П.И., Плетнева Н.П., Шагалиев Р.М. Численное исследование переноса рентгеновского излучения в вакуумной области // ВАНТ. Серия Моделирования физических процессов, 2020, вып. 2, с. 33–39.
3. Рыкованов Г.Н., Лыков В.А., Лебедев С.Н., Чижков М.Н. и др. Численное моделирование мишеней с непрямым воздействием для термоядерного зажигания на мегаджоульных лазерных установках // 55th APS PPD, USA, Denver, 2013.
4. Bagaev D., Grigoriev F., Kapurin I., Konshin I., Kramarenko V., Plenkin A. Improving parallel efficiency of a complex hydrogeological problem simulation in GeRA // In Russian Supercomputing Days, 2019. pp. 265–277, Springer, Cham.
5. Большаков Л.А., Глотов В.Ю., Головизнин В.М. и др. Валидация кода Cabaret-SC1 на экспериментах по водородной взрывобезопасности на АЭС // Атомная энергия. 2019, т. 127, вып. 4, с. 193–204.

А.В. Дуб¹, А.И. Рудской²

НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Стратегия развития Госкорпорации «Росатом» предполагает активное развитие и освоение в ближайшие 10 лет новых технологий. В настоящем разделе книги ограничимся только направлениями, связанными с разработкой новых материалов для перспективных проектов в интересах энергетики (рис. 1). Даже укрупненно таких направлений 8.

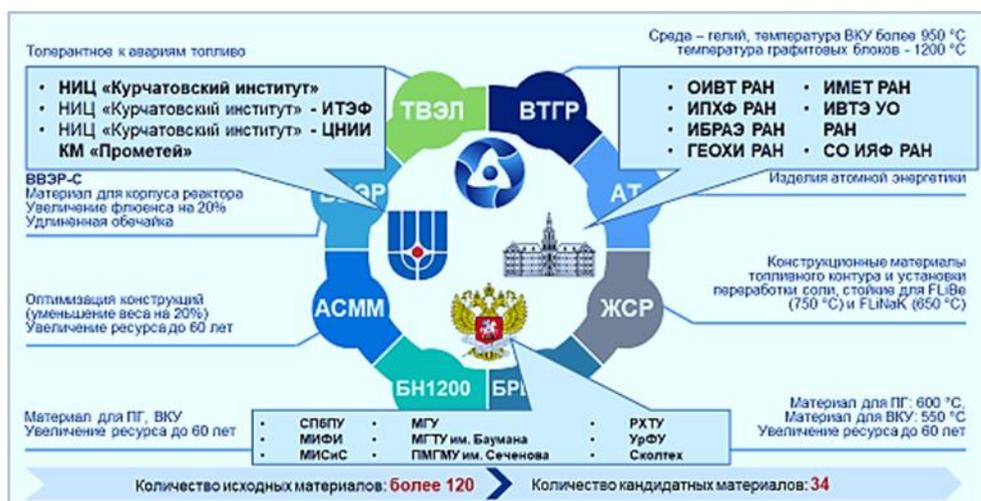


Рис. 1. Основные задачи по разработке новых материалов для перспективных проектов

Следует обратить внимание, что успех/эффективность обоснования и развития каждого из представленных технологических направлений, а также использование требуемых ресурсов конструкторских решений и обеспечение необходимого превосходства связаны с выходом за существующие традиционные базы данных по материалам и необходимости исследования механизмов поведения соответствующих материалов в новых условиях.

По оценкам, уже на входе количество исходных кандидатных материалов превышало 100, и возможность одновременной работы с ними требовала новых подходов. Комитетом по науке Госкорпорации «Росатом», НТС было

¹ Первый заместитель генерального директора АО «Наука и инновации», профессор.

² Ректор СПбПУ им. Петра Великого, академик РАН.

принято решение о выделении отдельной материаловедческой программы, одной из главных задач которой является существенное сокращение цикла внедрения новых материалов в конструкторские решения. Ключевым способом достижения этого является построение эффективных коопераций организаций Госкорпорации «Росатом» с институтами РАН, университетами, примеры которых представлены (рис. 1).

Одним из базовых принципов разработки новых материалов, тем более в условиях понимания того, что традиционные подходы в настоящее время фактически исчерпаны, состоит в том, что требования по надежности и обоснованности новых материалов, с одной стороны, понимание механизмов эволюции свойств в условиях эксплуатации, с другой стороны, требуют комплементарного вовлечения в рассмотрение всех уровней масштабных факторов – от микро- до макро. Поэтому взаимодействие между компонентами и фазовыми составляющими требует рассмотрения прежде всего на энергетическом уровне (рис. 2).

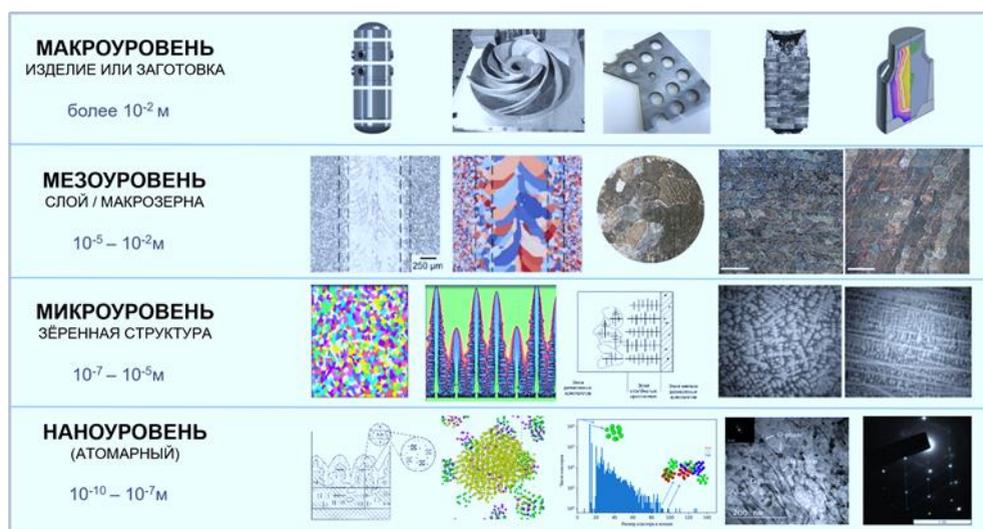


Рис. 2. Генезис материалов – взаимосвязь структурных уровней

Концептуально подход представляет собой пирамиду (рис. 3), в основании которой лежит принципиально большее, чем при обычных методах планирования эксперимента, число исходных наборов и сочетаний композиций, затем – уровень т.н. кандидатных материалов и финальный выбор.

Для сокращения времени механизмы отбора на каждом уровне также разные: на начальном этапе – математическое моделирование – компьютерное материаловедение; на этапе оценки кандидатных материалов – ускоренные имитационные методы испытаний; для окончательного выбора – утвержденный Ростехнадзором полный набор исследований, включая реакторные испытания.

Требования безопасности означают, что кроме разработки самих новых методик, обязательно чтобы все работы превратились в стандартные утвержденные процедуры. Поэтому помимо исследований в Технических заданиях обязательно ставятся задачи превращения этих подходов в соответствующие стандартные расчётные коды, программы и методики.

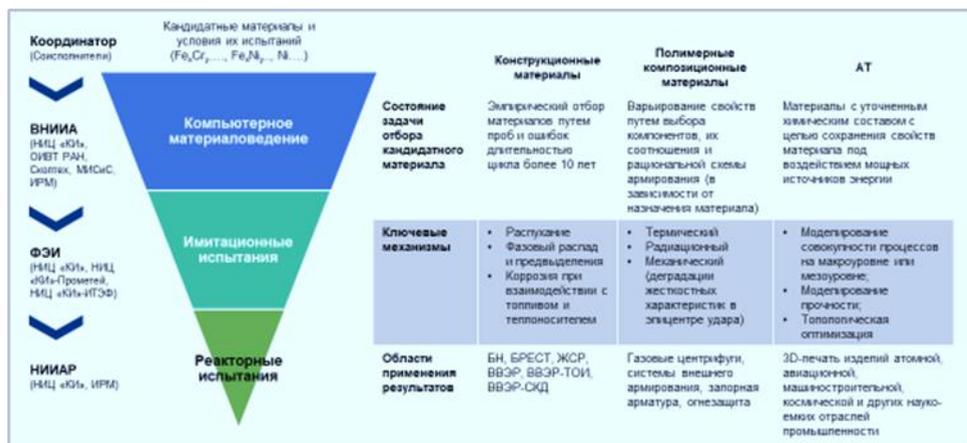


Рис. 3. Концепция отбора кандидатных материалов

Первый этап – компьютерное материаловедение.

Основная его задача – отбор кандидатных материалов из большого числа вариантов. Основными действенными инструментами здесь служат теория функционала плотности, динамическая теория среднего поля и др. Вычислительные инструменты предполагают использование методов машинного обучения и верификацию по базам данных.

Примеры уже проведенных расчетов (см. рис. 4) показывают, что оптимизация свойств для многокомпонентных (более 4) составов является трендом. Применительно к ферритомартенситным сталям (ФМС) проведены оценки для более 550 тыс. вариантов.

Следует отметить, что все результаты работ, входящих в Программу, касающуюся материалов, попадают в Базу данных, разработка и наполнение которой также является одним из проектов.

Ускоренные имитационные испытания.

Принципиальным отличием от традиционного подхода является следующее – кроме просто подбора внешнего вида микроструктуры материала в зоне облучения (ионного и нейтронного) удалось за счёт разработки специальных типов образцов показать аналогичность проявления доминирующего известного механизма деградации свойств материала при разных видах облучений. При этом дозовая нагрузка определяется в явном виде, обеспечивая при необходимости уровень радиационного воздействия более 200 с.н.а, что заняло бы в обычных условиях реакторных испытаний более 5–10 лет.

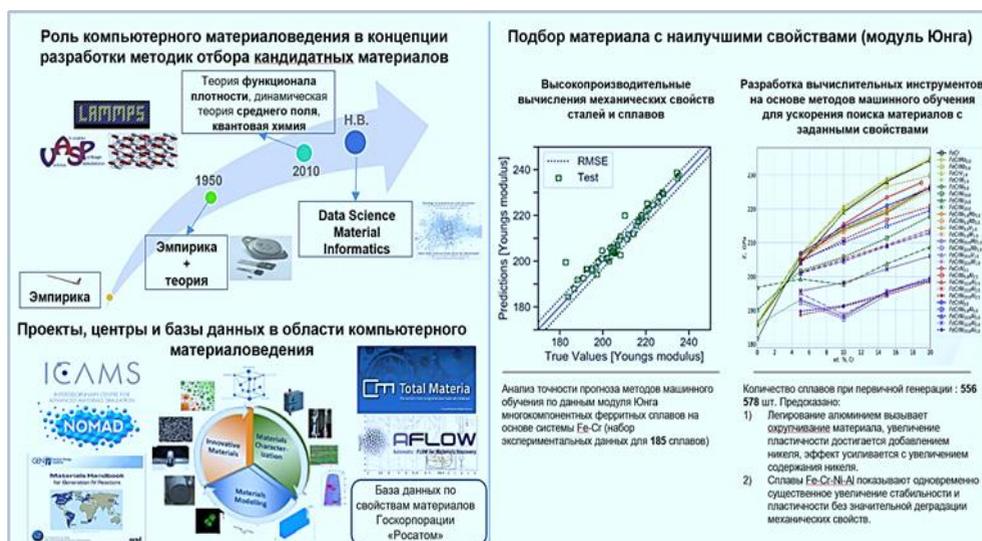


Рис. 4. Компьютерное материаловедение – «генезис материалов»

Испытывали все основные типы металлических материалов для атомной энергетики. Их результаты иллюстрируются на рис. 5, 6.

Рассматриваемая схема демонстрирует, каким образом можно перейти от просто ускоренных методов облучения к измерению микротвёрдости и микроиндентированию, провести пересчёт в механические свойства и определить критическую температуру для перехода из вязкого состояния в

хрупкое состояние, определить макропоказатели трещиностойкости и при этом подтвердить, что именно такие образцы являются представительными для конкретного типа и класса стали.



Рис. 5. Ускоренные имитационные исследования радиационной повреждаемости конструкционных материалов (методика)

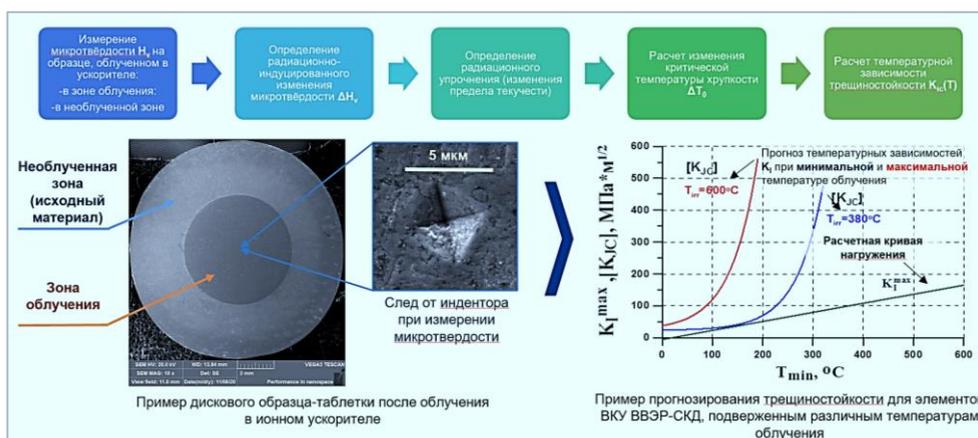
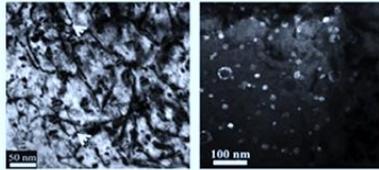


Рис. 6. Прогнозирование сопротивления хрупкому разрушению (трещиностойкости) конструкционных материалов на базе результатов испытаний образцов, облученных в ионном ускорителе

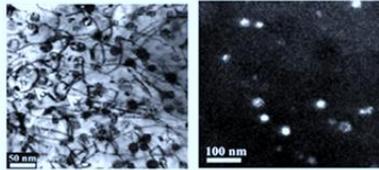
Важнейшим результатом станет развитие и создание стандарта испытаний на основе предложенной методики (рис. 7, 8).

Одновременное облучение ионами водорода, гелия и тяжёлых металлов имитирует деградацию микроструктуры аналогично реакторному облучению

Микроструктура стали HT9 (аналог ЭП823) при облучении в реакторе FFTF (США): 443 °С, 155 сна



Микроструктура стали HT9 (аналог ЭП823) при облучении ионами Fe 5МэВ: 460 °С, 188 сна



Проект «ЦИМИС»
(АО «ГНЦ РФ - ФЭИ»)

«Центр Имитационных Исследований радиационной стойкости конструкционных материалов»

Критерии соответствия деградации:

- 1) Качественные: вид микроструктуры
- 2) Количественные:
 - Диаметр вакансионных пор
 - Концентрация вакансионных пор
 - Диаметр дислокационных петель
 - Концентрация дислокационных петель
 - Механические характеристики (наноиндентирование)

Рис. 7. Развитие метода имитационных испытаний



Рис. 8. Ускоренные реакторные испытания (методика)

Необходимо обратить внимание, что методика позволила, например, за счёт непосредственного измерения именно структурночувствительных параметров материала определить различие во влиянии на радиационную стойкость, а следовательно, и ресурс, не регламентируемых различий в режимах термообработки.

Ниже рассмотрены результаты, полученные к настоящему времени.

1. Материалы для внутрикорпусных устройств перспективного реактора ВВЭР-СКД (рис. 9). Всего за 2 года (!) был отобран основной материал,

который уже проходит реакторные испытания. При этом проведён последовательный отбор сначала по критерию – поведение при радиационном распухании, затем при коррозионном воздействии среды сверхвысоких параметров, либо водородном охрупчивании после старения (механизмы деградации зависят от материала). При этом была обеспечена аналогия поведения этого материала на уровень облучения до 200 сна, что соответствует запредельному сроку службы предполагаемых материалов в реальных условиях.



Рис. 9. Примеры: материалы для ВКУ ВВЭР-СКД

2. Перспективные конструкционные материалы толерантного топлива на основе карбида кремния (рис. 10). Получены образцы подобного рода изделий. Важно, что в этой работе реализован полный цикл от компьютерного моделирования до получения экспериментальных изделий. Фактически это новая отрасль и опыт работы с волокнами из SiC.

3. Получение жаропрочных материалов. Реализованы механизмы нерадиационного упрочнения за счёт нановыделений – подобраны композиции и технологии, которые исключают появление в материале крупных частиц, а упрочнение обеспечивается именно за счёт выделения наноразмерных фаз. Это позволяет увеличить сроки эксплуатации материалов при обычных температурах до 100 раз, либо поднять для традиционных ФМС температуры эксплуатации на $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ на базах более 200 тыс. часов.



Рис. 10. Примеры: конструкционные материалы толерантного топлива

Новое – радиационная обработка показала, что в ФМС за счёт радиационного воздействия появляются высокодисперсные наноразмерные фазы, которые при обычных условиях не выделяются и приводят к равномерному упрочнению соответствующих материалов. При этом выделение этих фаз происходит при относительно высоких температурах (за 400–500 градусов), соответственно, получив такие материалы при этих температурах, использование их в обычных условиях может привести к появлению новой радиационной технологии упрочнения соответствующих материалов.

И еще одно важное направление – это возможность использования ускоренных частиц при облучении соответствующих структур для селективного удаления/замены соответствующих атомов. И тогда за счёт именно радиационного селективного воздействия можно получать фактически микрочипы (рис. 11).

4. В наших руках появились аддитивные технологии, которые характеризуются с точки зрения материаловедения уникальной особенностью. В относительно малом объёме жидкого расплава концентрируется большая энергия за счёт лазерного или электронного луча. Поэтому можно получить возможность без рассеяния или поглощения обеспечить целенаправленное воздействие на микроструктуру таких материалов (рис. 12), начиная с формирования первичной кристаллической структуры, за счёт модуляции

параметров пучкового излучения, которое вызывает помимо теплового воздействия еще и генерацию соответствующих ультразвуковых колебаний.



Рис. 11. Примеры: жаропрочные материалы

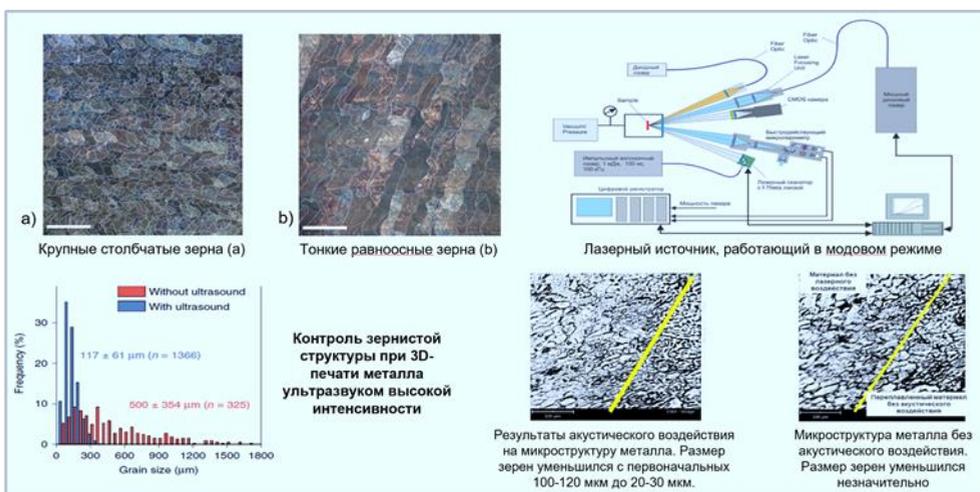


Рис. 12. Методы воздействия (пучковая энергия)

5. Жидкосолевые реакторы, агрессивные солевые расплавы. Актуальным является поиск материалов, достаточно устойчивых в среде «Флинак» (рис. 13, 14), которая является более агрессивной, но при этом растворяет большее количество минор-актинидов. Результаты проведенных исследований подтверждают возможность обеспечения скорости коррозии менее 30 мкм/год.



Рис. 13. Примеры: конструкционные материалы для ЖСР

Целевые показатели для металлических КМ:		Целевые показатели для УМК КМ:		
1.	$V_{кор}$ в Li, Na, K/F-UF _n -LnF ₃ -Te < 50 мкм/г	1.	$V_{кор}$ в Li, Na, K/F-UF _n -LnF ₃ -Te < 50 мкм/г	
2.	$\sigma_{0,2}$ > 200 МПа, σ_b > 450 МПа, δ > 40%	2.	Не менее 5 циклов: 750 – 25 – 750°C	
		3.	$\sigma_{0,2}^{750}$ > 50 МПа	

Материал	Скорость коррозии после 100 ч при 650 °С в Li, Na, K/F-UF _n -LnF ₃ -Te, мм/год	Механические свойства		
		Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Временное сопротивление σ_b , МПа	Относительное удлинение δ , %
Hastelloy® В-3	30	530	870	51
Экспериментальный сплав MB30У-ВД	10	840	925	44
Экспериментальный сплав XH87M28-ВМ	50	не определяли (н/о)	н/о	н/о
Экспериментальный сплав NM20B3-ВМ	50	н/о	н/о	н/о

Материал	Скорость коррозии при 750 °С в Li, Na, K/F-UF _n -LnF ₃ -Te, мм/год	Время выдержки, ч	Количество циклов термоциклирования	Механические свойства	
				Модуль Юнга E, ГПа	Предел прочности на сжатие $\sigma_{0,2}^{750}$, МПа
Углерод-углеродный композиционный материал С-С	20	2000	10	1,33	98,5
Спеченный карбид кремния SiC-C	21	500	4	122,7	2940

Рис. 14. Примеры: кандидатные материалы для LiF-NaF-KF

Полученные результаты позволяют выделить направления для совместной с РАН фундаментальной работы:

1. Исследования сочетания первопринципного моделирования свойств на основе развития квантовомеханических расчётов с использованием функционала плотности и последующего молекулярного моделирования с

возможностями машинного обучения на микроуровне с использованием результатов этих расчётов на мезо- и макроуровне.

2. Исследования природы радиационного повреждения материалов при воздействии нейтронов и заряженных частиц.

3. Изучение кинетических явлений при фазовых переходах и детальное исследование динамики кристаллизации металлов с возможностью воздействия на неё с использованием синхротронного, лазерного излучения и т.д.

В.В. Дремов¹

СОВРЕМЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛУТОНИЯ: ОТ ЭЛЕКТРОННОЙ СТРУКТУРЫ К «СТАРЕНИЮ»²

1. Введение

Исследования актинидов имеют долгую историю. Первый из актинидов уран был открыт в 1789 г., торий в 1828 г., актиний, давший название всему ряду – в 1899 г. Производство актинидов в промышленных масштабах было организовано в середине сороковых годов XX века в рамках атомного проекта.

Говоря о современных исследованиях, мы остановимся в основном на результатах, полученных в первые 20 лет XXI века, которые ознаменовались резким всплеском интереса к свойствам актинидов. Этот всплеск связан в первую очередь, с остановкой промышленных реакторов по производству плутония и необходимостью понять, как поведет себя уже произведенный материал в долгосрочной перспективе, а также с тем, что получило название «ренессанса ядерной энергетики», наблюдавшегося до катастрофы на атомной станции «Фукусима» в 2011 г.

Направления исследований включают как фундаментальную, так и прикладную составляющие. В области фундаментальных работ можно выделить такие направления, как расчетные и экспериментальные исследования электронной и магнитной структуры, исследование равновесных фазовых диаграмм чистых материалов и сплавов, химия актинидов и их растворов.

Прикладные исследования включают вопросы производства, разделения и очистки, старения, вызванного самооблучением, разработки и производства новых видов ядерного топлива, коррозионные свойства, а также важные вопросы охраны окружающей среды от негативного воздействия активных с химической и радиационной точек зрения актинидов.

В настоящем разделе мы ограничимся рассмотрением вопросов фундаментальных исследований электронной и магнитной структуры и прикладных исследований в области старения в результате самооблучения.

¹ Заместитель начальника научно-теоретического отделения РФЯЦ-ВНИИТФ им. ак. Е.И. Забабахина, доктор физико-математических наук.

² По материалам докладов на заседаниях общих собраний УрО РАН и ОХНМ РАН.

Будет показана тесная связь экспериментальных и теоретических работ как в области фундаментальных исследований, так и при решении прикладных задач по прогнозированию свойств материала в долгосрочной перспективе. Вопросы энергетики и охраны окружающей среды составляют темы отдельных сообщений.

2. Фундаментальные исследования. Электронная структура

Если посмотреть на зависимость атомного объема от атомного номера в рядах актинидов (5f), лантанидов (4f) и переходных металлов (5d), то обращает на себя внимание скачок при переходе от плутония к америцию (см. рис. 1). До плутония ряд актинидов ведет себя подобно 5d металлам и хорошо соответствует представлениям, в которых 5f электроны являются делокализованными и принимают участие в образовании химической связи. Начиная с δ -Pu (выделен на кривой) происходит переход к поведению, свойственному для 4f металлов с локализованными электронами.

Тонкая грань между локализацией и делокализацией 5f электронов в плутонии стала предметом всестороннего изучения и одной из основных проблем физики и химии актинидов в начале 21 века.

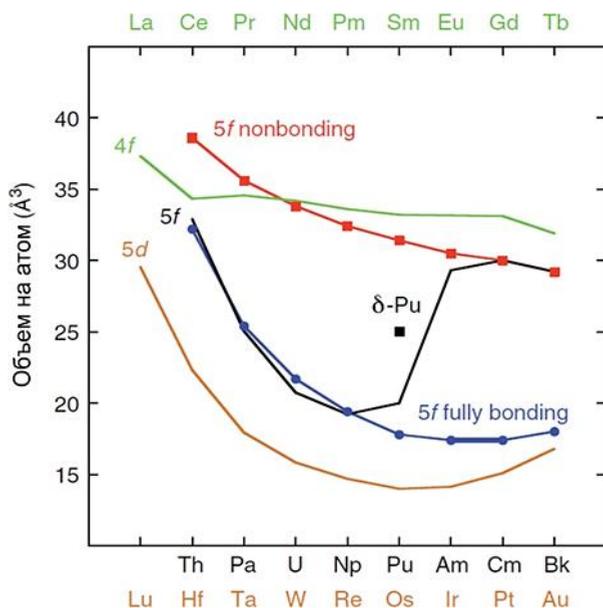


Рис. 1. Атомный объем в рядах актинидов (5f), лантанидов (4f) и переходных металлов (5d)

При изучении плутония квантовая теория твердого тела столкнулась с необходимостью объяснения ряда уникальных свойств, например, наличия в довольно узком температурном диапазоне в 600 градусов от 300 до 900К (0.05 эВ) шести полиморфных модификаций, сильно отличающихся по свойствам (см. рис. 2).

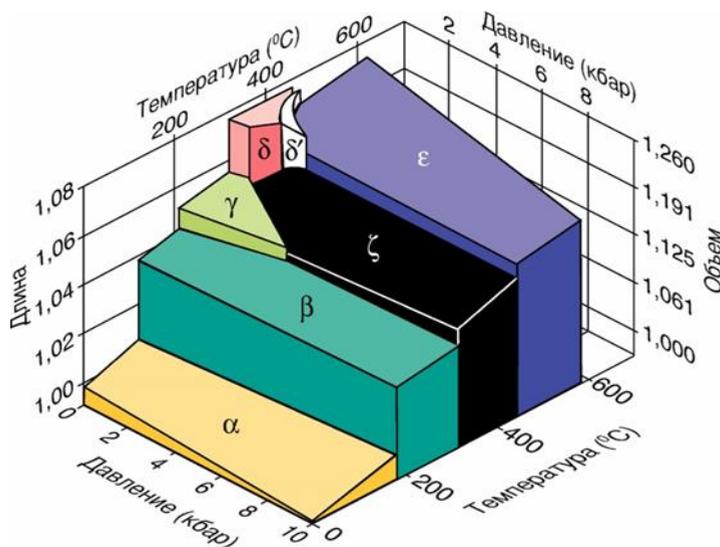


Рис. 2. Полиморфные модификации плутония (см. [1])

Основными инструментами исследования электронного строения и структурных особенностей актинидов и их сплавов являются квантовая теория твердого тела и молекулярная динамика с полуэмпирическими моделями межатомного взаимодействия, как инструменты теоретического анализа, а также такие экспериментальные методики, как фотоэлектронная спектроскопия, ЯМР, методики измерения фундаментальных физических характеристик – магнитной восприимчивости, теплоемкости, термического расширения, электронная микроскопия и специальная металлургия для получения модельных сплавов.

В качестве примеров пионерских работ, в которых были предприняты попытки воспроизвести базовые характеристики (удельный объем, последовательность фаз) различных фаз плутония в расчетах методом теории функционала плотности (DFT), можно привести работы [26, 16], выполненные в Ливерморской Национальной Лаборатории США (ЛЛНЛ) и РФЯЦ-ВНИИТФ, соответственно.

На рис. 3 показаны относительные значения энергий фаз, полученные в работе [26]. Фазовые переходы по мере повышения температуры соответствуют этой энергетике. Равновесные удельные объемы, соответствующие минимумам на каждой кривой, также находятся в удовлетворительном согласии с экспериментальными данными, включая гигантский скачок объема (~10%) при α - β переходе, что видно из сравнения с рисунком на врезке рис .3. Эти расчеты также воспроизводят упругие характеристики фаз.

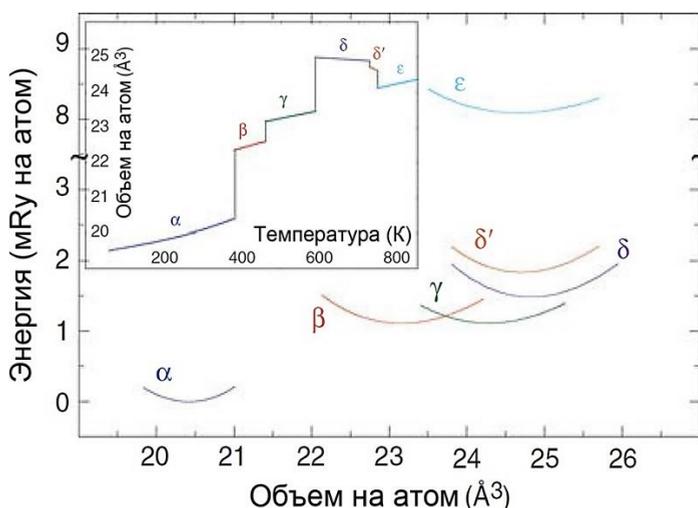


Рис. 3. Энергии полиморфных модификаций плутония в зависимости от удельного объема, полученные в DFT расчетах [2]. На врезке представлена экспериментальная зависимость удельного объема от температуры [26]

Во всех расчетах методом классической DFT наилучшие результаты были получены в постановке, которая приводит к большим локальным магнитным моментам на атомах, имеющих антиферромагнитное упорядочение [16].

Однако в 2005 г. была опубликована работа [17] команды исследователей из Лос-Аламосской Национальной Лаборатории (ЛАНЛ) США и Института трансурановых элементов в Карлсруэ, в которой в результате прецизионных экспериментов было показано, что основные состояния α - и δ -плутония являются немагнитными.

Ответом на это стало появление двух работ [24, 22], выполненных в ИФМ УрО РАН и в Карловом университете в Праге, в которых была предпринята

попытка объяснить немагнитное состояние и учесть сильные электронные корреляции в рамках подхода

DFT+U,

где U – так называемый параметр Хаббарда, характеризующий статическое среднее поле.

В этих расчетах было получено немагнитное основное состояние и показано, что немагнитный характер плутония есть следствие тонкого баланса между спин-орбитальным и обменным (Хундовским) взаимодействиями, нарушение которого в пользу последнего приводит к магнетизму. Этот же подход позволил объяснить немагнитный характер ряда соединений плутония, например PuCoGa_5 .

Обе работы [24, 22] также показали, что заполнение $5f$ уровня существенно отличается от $5f^5$ (согласно [24] это $5f^6$, а согласно [22] это $5f^{5.44}$). Такой результат вызвал широкую дискуссию и интенсивные экспериментальные и теоретические исследования, в которых были задействованы фотоэлектронная спектроскопия (PES), методы на основе поглощения синхротронного рентгеновского излучения и электронная спектроскопия (EELS), а также первопринципные методики отличные от DFT+U+SO.

В результате в совместной работе (ЛАНЛ, ЛЛНЛ, РФЯЦ-ВНИИТФ) [27] после анализа спектров было показано, что заполнение соответствует $5f^5$.

Как отмечается в совместном ИФМ УрО РАН и РФЯЦ-ВНИИТФ обзоре [3], причина расхождения результатов DFT+U и данных спектроскопии может быть в следующем.

Уровень Ферми в расчетах располагается у верхней границы занятой $j=5/2$ зоны, при этом центр зоны всего на 1 эВ ниже уровня Ферми, что может приводить к высокой вероятности возбуждения $5f$ электронов в пустые s , p и d состояния, лежащие выше уровня Ферми. Если учесть эти динамические флуктуации, то среднее число $5f$ электронов будет меньше, чем в решении, отвечающем статическому среднему полю.

Динамические флуктуации могут быть учтены в рамках теории динамического среднего поля (DMFT). Отсутствие динамических флуктуаций в подходе DFT+U приводит также к невозможности описания узкого пика на экспериментальных фотоэлектронных спектрах, расположенного вблизи энергии Ферми (см. рис. 4).

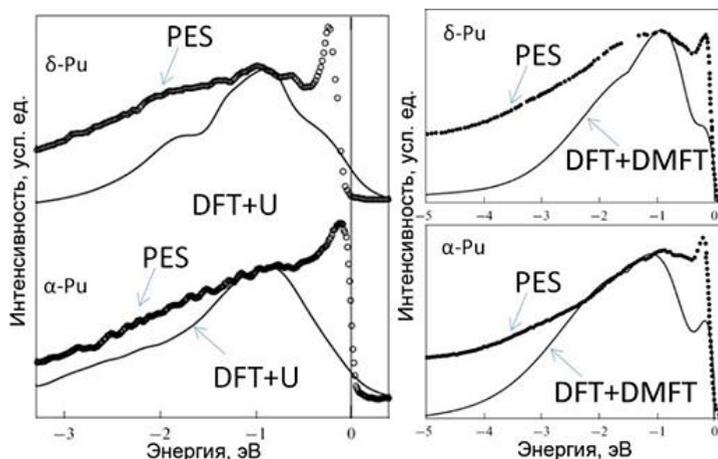


Рис. 4. Теоретические и экспериментальные фотоэлектронные спектры плутония. Кружки – эксперимент [4], тонкие линии – расчет DFT+U.
Рисунок из обзора [4]

Первые расчеты DFT+DMFT, выполненные для плутония, появились уже в 2001 г. [20]. В 2003 г. был теоретически предсказан фононный спектр δ -Pu [6], подтверждение которому было получено также в 2003 г. на синхротроне в Гренобле [29] (см. далее рис. 7).

Воспроизведение фотоэлектронного спектра в рамках DFT+DMFT было получено в 2007 г. в работах университета Рутгерс [23] и ИФМ УрО РАН [2] (см. рис. 4).

3. Прикладные исследования. Старение плутония

Одной из актуальных задач является прогнозирование изменения свойств ядерных материалов в результате самооблучения. Это явление получило название радиационного старения.

Микроскопические процессы, приводящие к старению, показаны на рис. 5. Следствием этих процессов может быть изменение макроскопических свойств, таких как плотность и прочность.

Применить первопринципные методики, т.е. методики, основанные на решении квантово-механической задачи, для расчета этих процессов на атомистическом уровне напрямую невозможно из-за необходимости моделировать системы, состоящие из сотен миллионов и миллиардов частиц. В то же время возможности квантовых расчетов ограничены в лучшем случае несколькими сотнями частиц.

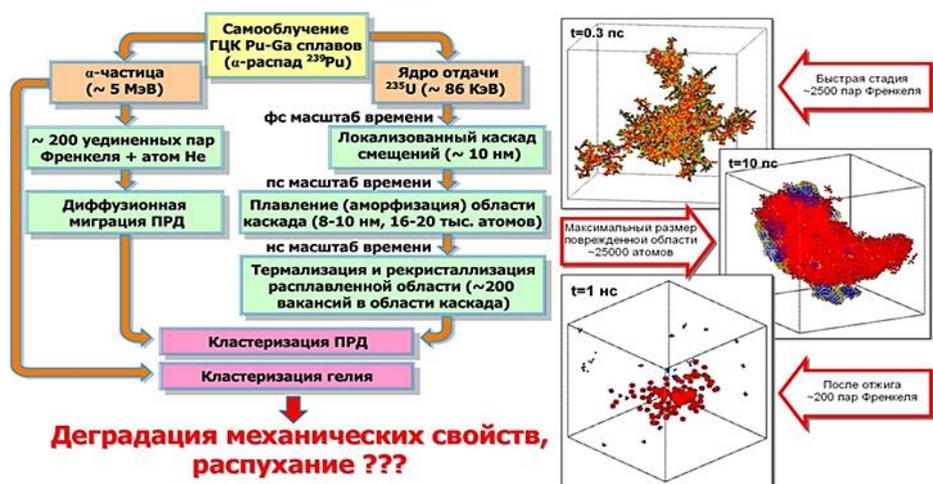


Рис. 5. Слева – микроскопические процессы, приводящие к старению ядерно-активных материалов. Справа – каскад повреждений кристаллической структуры, вызванный ядром урана-235 с энергией 86 кэВ, образовавшегося в результате радиоактивного распада ядра плутония-239. Результат моделирования [7]

Выход состоит в разработке более простых в математическом плане моделей межатомного взаимодействия, их параметризации по результатам экспериментов и первопринципных расчетов, и затем проведения расчетов уже с ними методом классической молекулярной динамики, как следующей ступени многомасштабного моделирования.

Схематически процедура параметризации таких моделей показана на рис. 6. В рамках этой схемы удалось построить атомистическую модель плутония и его сплавов с галлием с учетом накопления в нем радиогенных примесей. Составными частями этой модели стали полуэмпирическая модель межатомного взаимодействия GEAM (Generalized Embedded Atom Model), разработанная совместно РФЯЦ-ВНИИТФ и ЛАНЛ [12], первопринципные расчеты ИФМ УрО РАН взаимодействия плутония и гелия [8], а также экспериментальные данные, включая уникальные результаты, полученные в ИФМ УрО РАН методом ЯМР (Ядерный Магнитный Резонанс) по особенностям локального расположения галлия в решетке плутония [19].

С использованием этой модели были получены интересные результаты, не относящиеся к старению, но демонстрирующие ее способность к описанию реальных свойств, которые не были использованы при параметризации. Так,

в совместных работах ИФМ УрО РАН и РФЯЦ-ВНИИТФ [18, 25] были исследованы механизмы появления магнетизма в изначально немагнитном плутонии (о магнетизме см. выше), как следствие приложенного давления или образования радиационных дефектов.

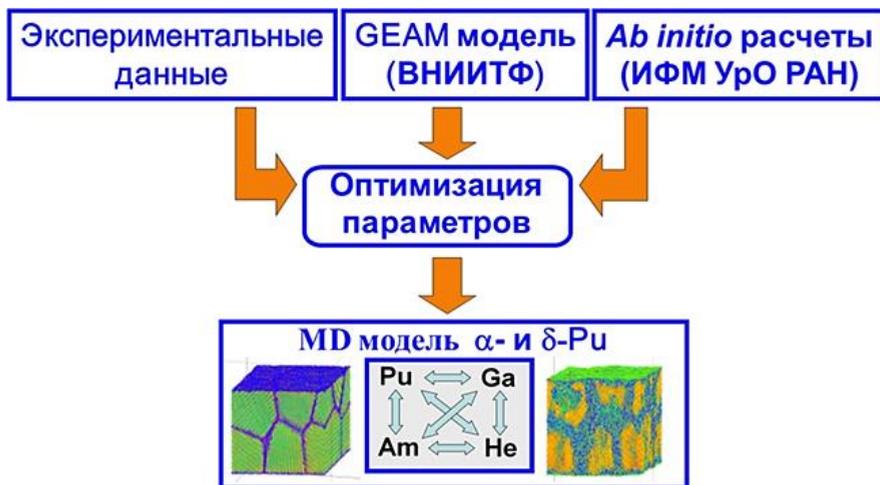


Рис. 6. Схема параметризации атомистических моделей для классической молекулярной динамики

В работе [11] проводились исследования структуры поверхности α - и δ -Pu, в которых был показан механизм дельта-фазной реконструкции на чистой поверхности α -Pu при повышении температуры в полном соответствии с данными фотоэлектронной эмиссии.

Дальнейшая тонкая настройка модели для описания упругих свойств проводилась с использованием экспериментальных фононных спектров, которые удалось воспроизвести с высокой точностью [15] (см. рис. 7).

Моделирование собственно эффектов, связанных с самооблучением, начинается с расчета характеристик каскадов радиационных повреждений, вызванных быстрыми частицами, возникающими в результате радиоактивного распада ядер плутония-239. Результат моделирования эволюции единичного каскада показан на рис. 5. Быстрая стадия длится несколько десятков наносекунд. За это время каскад вырастает до размера в ~ 10 нм, а затем отжигается, оставляя набор первичных радиационных дефектов, которые эволюционируют в намного большем временном масштабе.

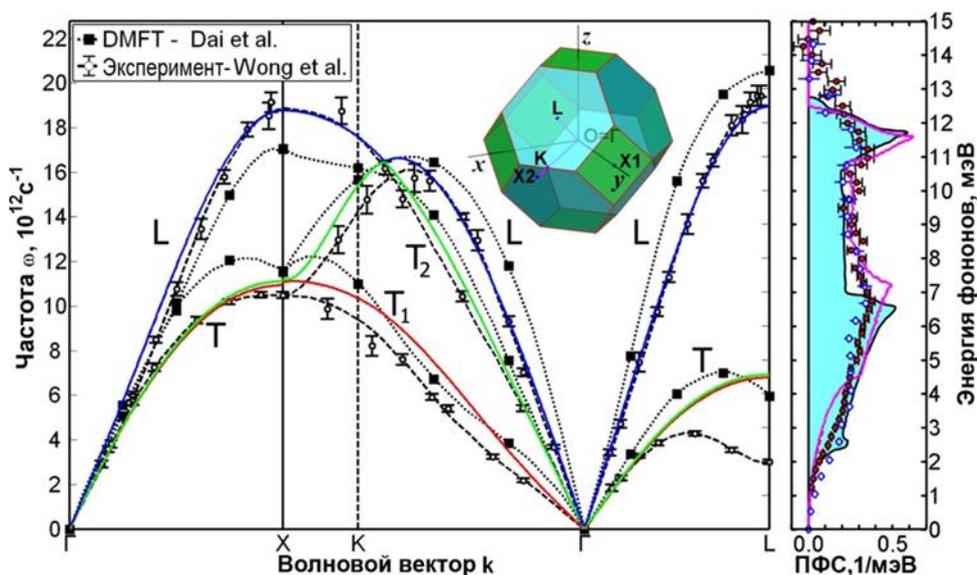


Рис 7. Фононный спектр и плотность фононных состояний δ -Pu. Значки с доверительными интервалами – экспериментальные данные [29], квадраты и тонкий черный пунктир – расчет DFT+DMFT [6] (Университет Рутгерс), цветные линии – атомистическая модель [15] (РФЯЦ-ВНИИТФ)

Интересно отметить, что первые две работы по молекулярно-динамическому моделированию каскадов повреждений в плутонии, выполненные в ЛЛНЛ и РФЯЦ-ВНИИТФ, появились одновременно – в 2007 г., в одном и том же номере журнала *J. Alloys and Compounds* [28, 7].

Для моделирования дальнейшей эволюции дефектов необходимо рассчитать их микроскопические характеристики и ввести их в качестве параметров в систему кинетических уравнений. Такими параметрами являются источник дефектов (система первичных радиационных дефектов после каскада), энергии образования и миграции различных типов дефектов, вероятности аннигиляции дефектов при взаимодействии друг с другом, силы стоков при взаимодействии первичных радиационных дефектов с имеющимися в структуре кристалла протяженными дефектами (дислокациями, границами зерен и т.д.).

Решение системы кинетических уравнений дает прогноз эволюции на десятки лет. При этом если расчет каскада повреждений и характеристик дефектов осуществляется в прямом атомистическом моделировании с

привлечением суперкомпьютеров, то решение системы кинетических уравнений можно доверить персональному компьютеру.

В результате такого моделирования можно предсказать систему дефектов в материале на любое наперед заданное время, затем внедрить эти дефекты в виртуальные образцы и в прямом атомистическом расчете смоделировать поведение материала в заданных условиях [9, 10]. Одним из результатов такого моделирования стал прогноз изменения плотности сплава Pu-Ga со временем, вызванного накоплением дефектов и радиогенных примесей.

На рис. 8 представлено сравнение результатов совместных расчетов РФЯЦ-ВНИИТФ и ЛАНЛ [10] с экспериментальными данными ЛЛНЛ [5].

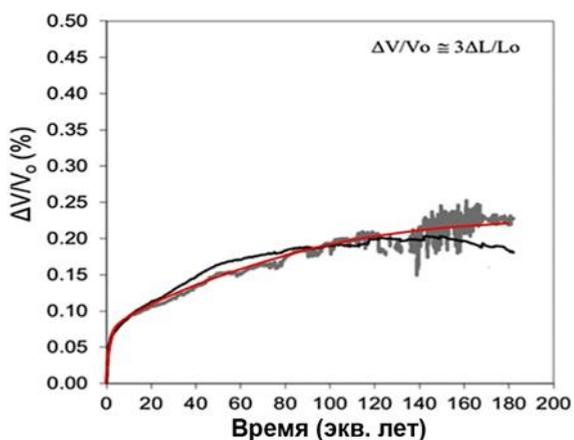


Рис. 8. Изменение удельного объема дельта-фазного модельного сплава плутония с галлием во времени, вызванное самооблучением при ускоренном старении (при добавлении 7% Pu-238). Черные линии – эксперимент (ЛЛНЛ) [5], красная линия – результат расчета по модели РФЯЦ-ВНИИТФ и ЛАНЛ [9, 10]. Время приведено в эквивалентных годах, соответствующих нормальному режиму самооблучения Pu-239

Из рисунка видно, что расчет очень хорошо воспроизводит данные эксперимента, полученные для модельного сплава, содержащего ~7 % процентов высокоактивного Pu-238. Данный исследовательский сплав используется для изучения эффектов старения в ускоренном режиме – интенсивность самооблучения приблизительно в 15 раз выше, чем в обычном материале. Важным выводом по результатам этих работ является отсутствие распухания на временах ~200 лет. При работе с этим сплавом пришлось также решать задачу об обосновании условий эквивалентности ускоренного и

естественного (т.е. свойственного Pu-239) облучения. Задача в чем-то схожая с актуальной проблемой имитационного облучения конструкционных материалов – обоснование эквивалентности нейтронного облучения в реакторах и ионного (ускоренного) облучения в ускорителях – с целью сокращения времени испытаний новых материалов.

Интересным явлением, свойственным дельта-фазным сплавам Pu-Ga, является накопление радиогенного гелия в виде нанометровых пузырьков в объеме материала. Характеристики пузырьков (распределение по размерам, концентрация газа) были подробно исследованы методом просвечивающей электронной микроскопии в ЛЛНЛ (Schwartz et al. 2005).

Теоретически процесс кластеризации гелия в решетке плутония был описан в совместной работе РФЯЦ-ВНИИТФ и ЛЛНЛ [14] (см. рис. 9), что позволило построить виртуальные образцы материала и провести моделирование влияния накопления гелия на механические характеристики, в первую очередь предел текучести.

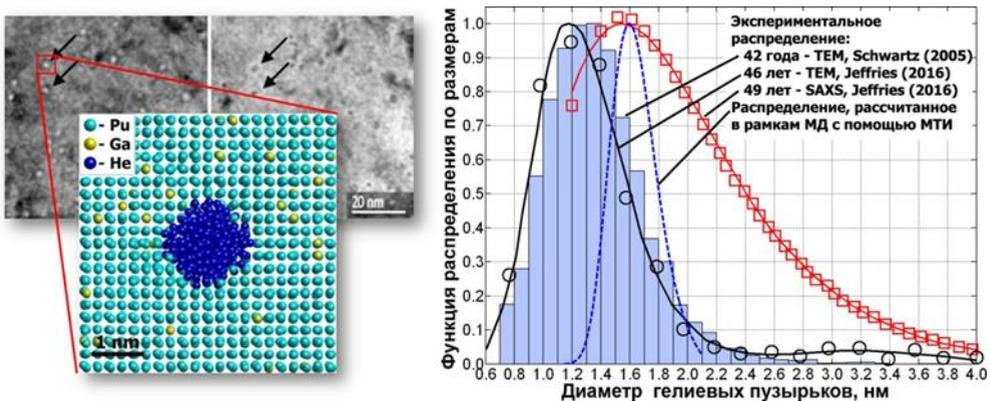


Рис. 9. Накопление гелия в δ -фазном сплаве Pu-Ga. Слева сверху – фотография с Просвечивающего Электронного Микроскопа (ПЭМ) [21], стрелками показаны гелиевые пузырьки. Слева внизу – молекулярно-динамическая модель гелиевого пузырька [14]. Справа – распределение пузырьков по размерам: гистограмма – данные ПЭМ [21], кружки и квадраты – результаты ЛЛНЛ, полученные методами ПЭМ и SAXS [13], синий пунктир – теоретический расчет [14]

При деформации возникают внутренние напряжения, которые после превышения некоего порогового уровня приводят дислокации в движение, и как только дислокации начинают двигаться, деформация превращается из упругой в пластическую. Таким образом, предел упругости, то есть

напряжение, при котором материал теряет упругие свойства и начинает течь, определяется свойствами дислокаций, присутствующих в материале. Плутоний по всем меркам необычный материал и дислокации в нем тоже необычные.

Из-за малой разницы в энергиях между кристаллической структурой самого плутония и структурой ядра дислокации, дислокация в плутонии похожа скорее на плоскую ленту, чем на нитку, как это показано на рис. 10.

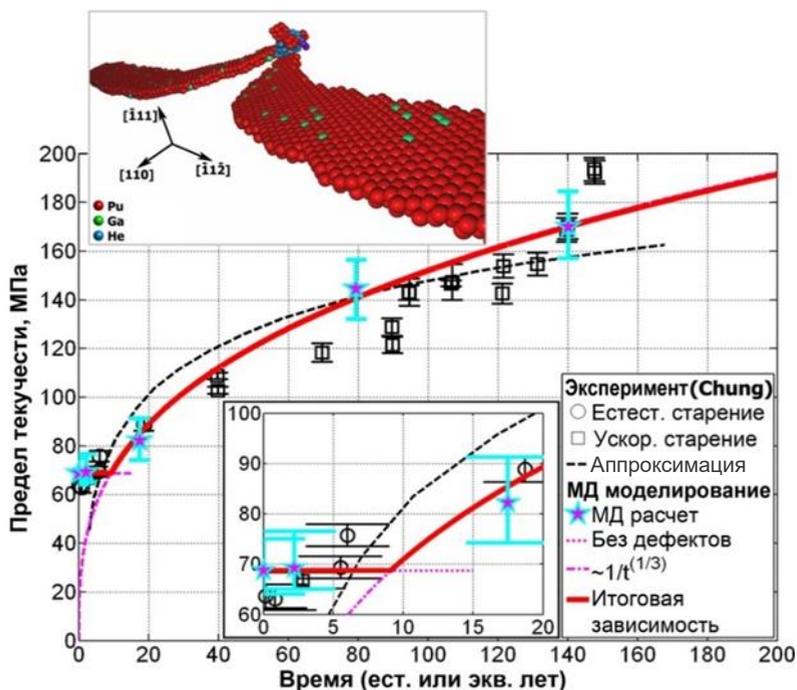


Рис. 10. Зависимость предела текучести от времени для модельного сплава Pu-Ga при ускоренном старении. Символы – экспериментальные данные ЛЛНЛ [5], красная кривая – атомистическое моделирование РФЯЦ-ВНИИТФ [15]. На вставке показано торможение дислокации на гелиевом пузырьке

В бездефектном материале (не считая, конечно, самих дислокаций) при малой концентрации дислокаций, когда они слабо влияют друг на друга, материал обладает наименьшим пределом упругости, так как ничто не препятствует скольжению дислокаций по решетке. Дефекты любого типа приводят к торможению дислокаций. На рис. 10 показано, как дислокация

натывается на гелиевый пузырек, который как торчащий «гвоздь» цепляет ленту дислокации, заставляя ее изгибаться.

В результате проведенного методом молекулярной динамики моделирования движения дислокаций в состаренном материале [15] было не только качественно, но и количественно показано, что торможение дислокаций на кластерах вакансий и гелиевых пузырьках, число которых растет со временем в результате постоянного самооблучения, приводит к «быстрому» (в течение 15–20 лет) и заметному повышению предела упругости (см. рис. 10). Как видно из рисунка, атомистическая модель РФЯЦ-ВНИИТФ [15] находится в отличном согласии с экспериментальными данными, полученным в ЛЛНЛ по методике ускоренного старения модельного сплава.

4. Заключение

Актиниды являются трудным объектом исследования из-за их высокой химической и радиационной активности. Их экспериментальные исследования требуют особых условий как по защите материалов от воздействий окружающей среды, так и по защите персонала и окружающей среды от их воздействия.

Объединением усилий теоретиков и экспериментаторов, физиков, химиков, металлургов и материаловедов в первые десятилетия XXI века удалось серьезно продвинуться в нашем понимании природы актинидов и решить важные практические задачи.

В настоящем разделе книги коснулись лишь одной из веток исследований, проведенных в первые два десятилетия XXI века, и показали цепочку работ, которая от фундаментальных исследований электронной структуры привела к решению важных прикладных задач.

Одним из главных факторов успеха в реализации этой цепочки исследований стала кооперация институтов РАН и ГК «Росатом», а также международное сотрудничество.

Литература

1. Плутоний. Фундаментальные свойства. Под редакцией Б.А. Надыкто и Л.Ф. Тимофеевой, РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров, 2000 г.

2. V.I. Anisimov, A. O. Shorikov, and J. Kuneš, *J. Alloys Compd.* 444–445, 42–49 (2007).
3. V.I. Anisimov, V.V. Dremov, M.A. Korotin, G.N. Rykovanov, V.V. Ustinov, *The Physics of Metals and Metallography*, 114 (2013), 1087–1122.
4. A.J. Arko, J. J. Joyce, L. Morales, J. Wills, J. Lashley, F. Wastin, and J. Rebizant, *Phys.Rev. B* 62, pp. 1773–1779 (2000).
5. B.W. Chung, K.E. Lema, P.G. Allen, *J. Nucl. Mater* 471 (2016), 239–242.
6. X. Dai, S.Y. Savrasov, G. Kotliar, A. Migliori, H. Ledbetter, E. Abrahams, *Science* 300, 953 (2003).
7. V.V. Dremov, F.A. Sapozhnikov, S.I. Samarin, D.G. Modestov, N.E. Chizhkova, *J Alloy Compd.*, v. 444–445, p.197–201 (2007).
8. V.V. Dremov, V.I. Anisimov, M.A. Korotin, M.A. Zocher, D.L. Preston, *Phys. Rev. B*, 77 (2008) 224306.
9. V.V. Dremov, A.V. Karavaev, S.I. Samarin, F.A. Sapozhnikov, M.A. Zocher, D.L. Preston, *J. Nucl. Mater.*, 385 (2009), 79–82.
10. V.V. Dremov, A.V. Karavaev, F.A. Sapozhnikov, M.A. Vorobyova, D.L. Preston, M.A. Zocher, *J. Nucl. Mater.* , 414 (2011), 471–478.
11. V.V. Dremov, A.V. Karavaev, G.V. Ionov, *Actinides Research Quarterly*, 4 (2016), 57–60.
12. G.V. Ionov, F.A. Sapozhnikov, V.V. Dremov, M.A. Zocher, D.L. Preston, *J. Nucl. Mater.*, 435, (2013), 10–16.
13. J.R. Jeffries, T. van Buuren, T. Willey, M.A. Wall, D. Ruddle, J. Ilavsky, P. Allen, Probing He bubbles in naturally aged and annealed Pu alloys using small angle X-ray scattering, *Proceedings of «Pu Futures. The Science» Conference, Baden Baden, Germany, 2016.*
14. A.V. Karavaev, V.V. Dremov, G.V. Ionov, B.W. Chung, *Acta Mater.*, 79 (2014), 248–257.
15. A.V. Karavaev, V.V. Dremov, and G.V. Ionov, *J. Nucl. Mater*, 496 (2017), 85–96.
16. A.L. Kutepov, S.V. Kutepova, *J. Phys. Cond. Mat.*, 15 , 2607–2624 (2003).
17. J.C. Lashley, A. Lawson, R.J. McQueeney, G.H. Lander, *Phys. Rev. B* 72, 054416 (2005).
18. A.V. Lukoyanov, et al. *J. Phys.: Condens. Matter* 22, 495501 (2010).
19. Yu. Piskunov, K. Mikhalev, A. Gerashenko, et al., *Phys. Rev. B*, 71 (2005) 174410.
20. S. Y. Savrasov, G. Kotliar, and E. Abrahams, *Nature* 410, 793–795 (2001).
21. Schwartz AJ, Wall MA, Zocco TG, Wolfer WG. *Philos Mag*, 85 (2005), 479–488.
22. A.B. Shick, V. Drchal, and L. Havela, *Europhys. Lett.* 69, 588–594 (2005).
23. J.H. Shim, K. Haule, G. Kotliar, *Nature* 446, 513 (2007).

24. A.O. Shorikov, A.V. Lukoyanov, M.A. Korotin, and V.I. Anisimov, *Phys. Rev. B* 72, 024458 (2005).

25. A.O. Shorikov, et al. *J. Experimental and Theoretical Physics*, 117 (2013) 691–698.

26. P. Söderlind, B. Sadigh, *Phys. Rev. Lett.*, 92, 185702 (2004).

27. J. G. Tobin, P. Soderlind, A. Landa, K.T. Moore, A.J. Schwartz, B.W. Chung, M.A. Wall, J.M. Wills, R.G. Haire, and A.L. Kutepov, *J.Phys.: Condens. Matter* 20 (2008), 125204.

28. W.G. Wolfer, A. Kubota, P. Soderlind, A. Landa, B. Oudot, B. Sadigh, L.B. Sturgeon, *J. Alloy Compd.*, v. 444–445, p.72–79 (2007).

29. J. Wong, M. Krisch, D.L. Farber, F. Occelli, A.J. Schwartz, T.-C. Chiang, M. Wall, C. Boro, R.Q. Xu, *Science* 301, 1078 (2003).

И.Г. Тананаяев¹, А.Ю. Цивадзе², Е.В. Захарова³, И.А. Иванов⁴

РЕШЕНИЕ ВАЖНЕЙШИХ РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ⁵

Введение

Символическим днем рождения атомной отрасли России считается 20.08.1945, когда Государственный комитет обороны СССР принял решение об организации Специального комитета и Первого Главного управления для проведения работ по ядерной тематике. Однако известно, что исследования в области ядерной физики велись в СССР в довоенную пору, когда в 1921 г. был создан Радиевый институт, в котором в 1935 г. был создан первый в Европе циклотрон.

В 1939 г. Я.Б. Зельдович, Ю.Б. Харитон, А.И. Лейпунский обосновали возможность протекания в уране цепной ядерной реакции деления, а в 1940 г. Президиумом АН СССР была утверждена программа работ по изучению реакций деления урана.

Однако основной историей отечественной атомной отрасли стала реализация Атомного проекта СССР. В нем АН СССР предписывалось «возобновить работы по исследованию осуществимости использования атомной энергии путем расщепления ядра урана и представить к 01.04.1943 доклад о возможности создания урановой бомбы или уранового топлива».

В 1943 г. была образована Лаборатория измерительных приборов №2 АН СССР (ныне – РИЦ «Курчатовский институт»). Благодаря усилиям ученых в 1946 г. впервые в реакторе Ф-1 под руководством И.В. Курчатова была осуществлена самоподдерживающаяся цепная реакция деления урана, а двумя годами позже был запущен первый промышленный уран-графитовый реактор «А» по наработке плутония на комбинате № 817 (ныне – ПО «Маяк», г. Озерск Челябинской обл.).

¹ Дальневосточный федеральный университет, член-корреспондент РАН.

² Научный руководитель ИФХЭ РАН, академик РАН.

³ Заведующий лабораторией ИФХЭ РАН, кандидат химических наук.

⁴ Директор Озёрского технологического института НИЯУ МИФИ, кандидат технических наук.

⁵ По материалам доклада на заседании общего собрания ОХНМ РАН.

Наконец, в 1949 г. на Семипалатинском полигоне был успешно испытан первый советский ядерный заряд. Таким образом, был заложен краеугольный камень в создание «ядерного щита» СССР [10].

Обеспечив для государства «ядерный щит», атомная отрасль переориентировала свою деятельность на решение гражданских задач, достигнув крупных успехов в области обеспечения электрической энергии, активизации арктического транзита, производства изотопной продукции и топливных композиций для атомных станций и т.д.

Однако дальнейшее развитие атомных технологий тормозится нерешенной проблемой окончания утилизации имеющихся на территории России радиоактивных отходов. Известно, что на территории России находится более 600 млн м³ радиоактивных отходов (РАО) общей активностью более 1,5 млрд кюри. Наиболее опасными являются РАО, накопившиеся в результате реализации оборонных программ [1, 12, 15, 28].

В 2008 г. была запущена и действует Федеральная целевая программа «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности в Российской Федерации». Государство впервые субсидировало огромные средства на выполнение важнейших задач, связанных с выводом из эксплуатации и реабилитация наиболее значимых и радиационно-опасных объектов: промышленных уран-графитовых реакторов и технических водоемов-хранилищ высокоактивных отходов. Также выполнялись актуальные работы по обеспечению радиационной безопасности в Приморском крае, в том числе за счет вывода из эксплуатации атомных подводных лодок. Настоящая статья содержит основные результаты выполнения упомянутых задач.

Вывод из эксплуатации промышленных уран-графитовых реакторов

В СССР было построено 13 «оружейных» промышленных уран-графитовых реакторов (ПУГР) -5 на ФГУП «ПО «Маяк», 5 на ФГУП «СХК» и 3 на ФГУП «ГХК» [21]. Первый ПУГР для наработки плутония был пущен в июне 1948 г. на площадке ПО «Маяк» [24].

В 1991 г. по Межправительственному Соглашению между СССР и США реакторы по наработке оружейного плутония были остановлены. Была поставлена задача высокой сложности – вывести их из эксплуатации. Реакторные здания обладают большими размерами, как надземной частью высотой более 40 м, так и подземной – шахта реактора, бассейны,

транспортные, технологические и контролирующие системы жизнеобеспечения, заполненные металлоконструкциями, разнокалиберными трубами, силовой электроникой. Нельзя не сказать и о радиоактивных загрязнениях оборудования, помещений и территории.

Решением ГК «Росатом» были рассмотрены два варианта вывода из эксплуатации ПУГР:

извлечение конструкций, оборудования и графитовой кладки с последующей фиксацией в пункт захоронения радиоактивных отходов (ПЗРО);

создание объекта окончательной изоляции «особых» РАО на месте расположения ПУГР (вывод из эксплуатации «на месте»).

При использовании первого варианта, фрагментирование, измельчение и извлечение оборудования, металлоконструкций и графитовой кладки реактора с последующим захоронением их в специальном ПЗРО, может повыситься уровень радиационного аэрозольного загрязнения в помещениях реакторов и на площадке размещения, а также уровень облучения персонала, осуществляющего демонтажные работы. Создание же специальных ПЗРО значительной вместимости для безопасного захоронения извлекаемых РАО, а также организация транспортирования их от мест извлечения из реакторов до ПЗРО приведут к существенному увеличению объема финансирования.

Поскольку второй вариант, по мнению авторов, предпочтителен, была разработана процедура его последовательного осуществления. Прежде всего была предложена концепция приведения ПУГР, сооружений и территории в конечное состояние, отвечающее современным требованиям нормативных документов по безопасности, устанавливающих предельные величины эффективной дозы облучения и пределы годового поступления отдельных радионуклидов с вдыхаемым воздухом для персонала. Было предусмотрено выполнение и контроль параметров пожарной безопасности при ведении работ по выводу из эксплуатации ПУГР (рис. 1) [9].

Затем в рамках концепции подразумевалась выгрузка отработавшего ядерного топлива с переводом ПУГР в ядерно-безопасное состояние в соответствии с обеспечением защиты окружающей среды, персонала и населения на основе уже оцененной ранее минимизации дозовых затрат на проведение работ.

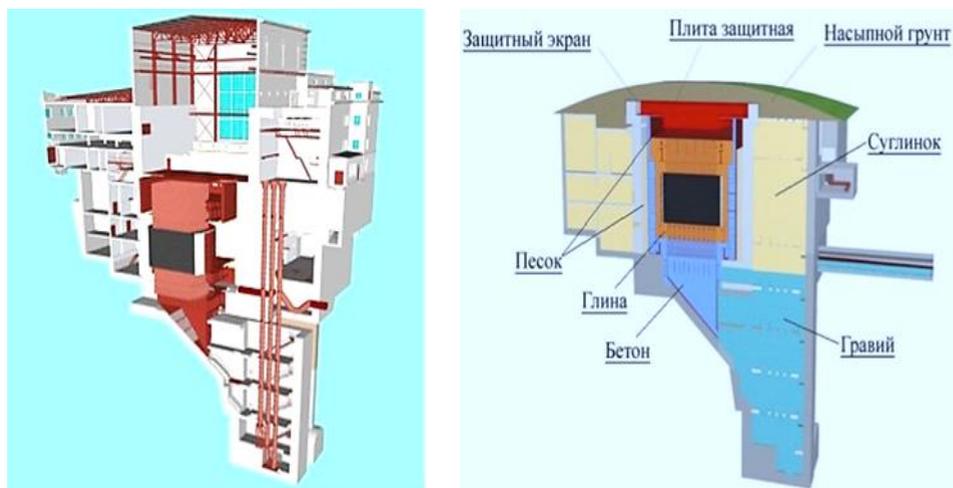


Рис. 1. Концепция вывода ПУГР из эксплуатации «на месте»: общий вид выводимого из эксплуатации ядерного объекта ПУГР (на примере ПУГР АВ-1, ПО «Маяк») (слева); схема заполнения барьерными материалами внутренних пространств реакторов с визуализацией на трехмерной анимационной компьютерной модели (справа)

Следующей операцией являлось комплексное инженерное и радиационное обследование, а также экспериментальные и расчетные исследования ядерно-физических и радиационных характеристик оборудования, материалов, радиоактивных и нерадиоактивных отходов, находящихся в пределах ПУГР. Подразумевалась материализация демонтируемого оборудования и других материальных ресурсов, высвобождающихся в процессе вывода их из эксплуатации в части их дальнейшего использования с учетом организации и мониторинга радиационной обстановки на объектах, выводимых ПУГРов.

Основополагающей стадией в концепции являлись необходимые прогнозные расчеты миграции радионуклидов как в объеме графитовой кладки (с учетом мест их локализации), так и за ее пределами. Поэтому приоритетной задачей являлась разработка мер по созданию глубокоэшелонированной системы защитных барьеров нераспространения радионуклидов в объекты окружающей среды, соответствующих требованиям действующих федеральных норм и правил в области атомной энергии.

Основой в решении данной задачи являлся систематический поиск максимально эффективных барьерных материалов с наилучшими физико-механическими и сорбционными характеристиками.

В ИФХЭ РАН были изучены основные характеристики ряда природных материалов, определяющих их технологические и функциональные свойства [22]:

физические свойства (гранулометрический, минеральный и химический состав; насыпная плотность, влажность, коллоидальность, влагоемкость, удельная поверхность);

механические свойства (текучесть и деформация дисперсных материалов в сухом состоянии);

коллоидные свойства (образование и миграция глинистых коллоидов);

эволюционные свойства (физико-химическая устойчивость при взаимодействии с природно-техногенной системой);

компрессионно-фильтрационные свойства (проницаемость и деформация в водонасыщенном состоянии под нагрузкой, капиллярное всасывание, давление набухания);

сорбционные свойства (емкость катионного обмена, коэффициенты сорбционного распределения радионуклидов, сорбционная емкость);

диффузионные свойства (диффузия радионуклидов в поровом растворе).

На основании полученных результатов был сделан вывод о том, что наилучшими барьерными материалами становятся добываемые промышленностью коалиновые и бентонитовые глины местного природного происхождения, для которых были разработаны подходы к их сушке, измельчению, модификации и прессованию (рис. 2). В сыпучем виде они характеризуются высокой текучестью для заполнения полостей сложной геометрии и способностью к самоуплотнению в сухом состоянии, обеспечивая в том числе стабилизирующую роль засыпки.

Еще в 2010 г. на базе реакторного завода АО «СХК» было создано ОАО «Опытно-демонстрационный центр вывода из эксплуатации уран-графитовых ядерных реакторов» (ОАО «ОДЦ УГР»), единственным учредителем которого стало АО «СХК». Созданное ОАО «ОДЦ УГР» было призвано реализовать одну из приоритетных целей ГК «Росатом» – обеспечение вывода из эксплуатации ядерно- и радиационно-опасных объектов, отвечающего современным международным нормам.



Рис. 2. Промышленная линия ГК «ПИК» для производства дисперсных смесей для установления внутренних и внешних барьеров для вывода из эксплуатации ПУГР ЭИ-2 (ФГУП «СХК»): обогатительная установка ИСА (слева), бункера с системами опорожнения (справа)



Рис. 3. Вывод из эксплуатации ПУГР ИЭ-2 (АО «СХК», г. Северск, Томская обл.): выводимый из эксплуатации объект (слева); «зеленая лужайка» по завершению вывода из эксплуатации объекта (справа) (фото: <https://interaffairs.ru/news/show/17723>)

С 2014 г. ОАО «ОДЦ УГР» входит в контур управления Дивизиона заключительной стадии жизненного цикла ГК «Росатом» для реализации важнейшей приоритетной цели – обеспечение своевременного, отвечающего современным международным нормам вывода из эксплуатации ядерно-радиационно-опасных объектов.

Была разработана технология бетонирования облучённой графитовой кладки с последовательным созданием многобарьерной системы безопасности путём закачки в полости специального материала на основе природных, механо-активированных глин. Для недопущения проникновения атмосферных воздействий был создан дополнительный конструктивный элемент – экран. Система инженерных барьеров не позволит в течение 10 тысяч лет

радионуклидам мигрировать за пределы созданного пункта долговременного хранения радиоактивных отходов и проникать в водоносные слои.

Закрытие акватории технического водоема В-9 на ПО «Маяк»

Создание отечественного ядерного оружия в промышленном масштабе началось на комбинате № 817 (ныне – ФГУП «ПО «Маяк»). Для хранения ЖРО высокого и среднего уровня активности для радиохимического завода предусматривался ввод емкостей-хранилищ. Однако в эксплуатацию была введена только одна очередь на 15 тыс. м³, и недостаточное количество емкостей приводило к сбросам радиоактивно загрязненных вод в р. Течу [16]. В результате её пойма была загрязнена радионуклидами.

Для недопущения дальнейшего сброса в р. Теча комиссией под председательством А.П. Александрова в 1951 г. было принято решение об использовании озера Карачай (В-9) для сброса дебалансных отходов (рис. 4).



Рис. 4. Озеро Карачай (промышленный водоем В-9 на ПО «Маяк»)

К началу XXI века в озеро В-9 было направлено >120 млн ки ЖРО и до 190 тыс. м³ техногенных осадков. С учетом радиационных выбросов в 1967 г. на прилегающие территории, в таких условиях единственным вариантом ликвидации водоема являлся вариант его консервации с локализацией отходов на месте их нахождения [5].

Для консервации В-9 было необходимо провести систематический анализ состояния и миграционной активности радионуклидов, находящихся в грунтовых водах близ водоема.

Созданная на технической площадке ПО «Маяк» вокруг В-9 сеть наблюдательных скважин позволила показать:

1) миграции загрязнения в подземных водах обусловлена конвективным переносом, гравитационным перемещением растворов высокой плотности и действием факторов рассеяния (фильтрационная дисперсия, радиоактивный распад, физико-химическое взаимодействие растворов с водовмещающими горными породами);

2) загрязненные воды обладают различной минерализацией от рассолов до 82,8 г/л в центральной части ореола, до практически пресных вод во фронтальной части водоема; при этом для загрязненных вод характерно зональное строение и в плане концентрации компонентов с уменьшением к периферии, удалением от источника загрязнения, по вертикали – возрастанием с глубиной вплоть до 50–100 м от земной поверхности;

3) основными загрязняющими веществами являются нитрат-, нитрит-ионы и радионуклиды техногенного происхождения (⁹⁰Sr, ³T, уран, ⁶⁰Co, ¹⁰⁶Ru, ¹³⁷Cs);

4) протяженность ореолов по отдельным компонентам-загрязнителям различна; она определяется их концентрациями, периодом радиоактивного распада, кислотными и редокс-условиями транспортной среды, физико-химическими свойствами мигрирующих элементов, растворимостью и устойчивостью их миграционных форм в существующих условиях массопереноса, а также способностью участия в геохимических процессах (сорбции, ионном обмене, соосаждении, гидролизе и т.д.).

Индикатором техногенного загрязнения подземных вод явился нитрат-ион NO₃ – как компонент загрязнения. Внешняя граница ореола загрязнения в подземных водах по содержанию в водах нитрат-иона был определен до 0,045 г/л с площадью загрязненных подземных вод до 10 км².

Было показано, что такие радионуклиды, как ^{106}Ru и ^{60}Co , не взаимодействуют с породами ложа водоема и водовмещающей средой, тогда как ^{137}Cs , и прежде всего, ^{90}Sr накапливаются в подстилающих породах ложа водоема и водовмещающих трещиноватых вулканогенно-осадочных породах, окружающих В-9. В центральной части, вблизи водоема, находились ореолы урана и минорных актинидов.

Натурное обследование водоема Карачая в 2002–2005 гг. показало, что общий запас β -активных нуклидов в незакрытой части водоема составлял 25 млн кКи, из них в воде находилось 11%, в техногенных илах – 75%, в суглинках ложа водоема – 14%. Суммарный запас α -активных нуклидов составил 700 кКи, в том числе 0,8% в воде, 3,4% – в суглинках ложа, 95,8% – в техногенных илах.

По результатам исследований был сделан вывод: обводненные породы твердого ореола после прекращения эксплуатации В-9 будут являться источником вторичного загрязнения подземных вод. При этом экспериментально было доказано, что коэффициенты десорбции нуклидов не являются обратными величинами коэффициентов сорбции в идентичных химических условиях, и с увеличением степени разбавления промышленных растворов скорость десорбции радионуклидов будет уменьшаться [16, 13, 20].

Засыпка первых 15–20 тыс. м² береговой загрязненной полосы суглинистым грунтом была начата в 1969–1972 гг. Было показано, что засыпка непосредственно акватории водоема, где подвижные донные отложения имели значительную толщину, не представлялась возможной. Обнаружилось, что при засыпке донные отложения вытеснялись на поверхность воды, создавая предаварийную ситуацию.

Поэтому с 1973 г. для засыпки В-9 начали использовать скальный грунт. В 1980 – 1981 гг. была проведена засыпка северо-восточной части водоема калиброванным бутом диаметром до 0,3 м, однако это приводило к вытеснению илов на поверхность воды. В дальнейшем с 1983 по 1985 г. для засыпки были взяты специально сконструированные полые железобетонные кубы с открытой нижней гранью ПБ-1 с эффективной пористостью блочного массива до 0,65 (рис. 5).

Это оказалось достаточным для эффективной локализации техногенных илов [5].



Рис. 5. Закрытие акватории оз. Карачай (промышленный водоем В-9) на ПО «Маяк» полыми железобетонными кубами с открытой нижней гранью ПБ-1 (разработка ПО «Маяк») с применением специальной техники

В 1988 и 1990 годах были разработаны проекты ликвидации (консервации) В-9 первой и второй очереди. По проекту первой очереди закрытию подлежала северо-восточная часть акватории водоема и отсыпка разделительных дамб с разбивкой акватории водоема на чеки. К началу 90-х было локализовано 60% всего объема подвижных донных отложений и 70% всех радионуклидов, накопленных в В-9, площадь акватории водоема была уменьшена на треть (рис. 6).

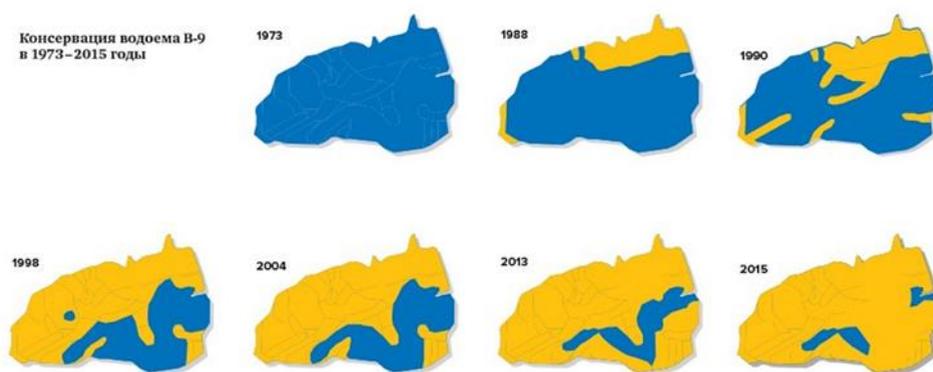


Рис. 6. Хронология процесса закрытия акватории озера Карачай (промышленный водоем В-9 на ПО «Маяк»)

Проект консервации В-9 второй очереди предусматривал полную ликвидацию акватории и ее рекультивацию, а также реабилитацию

ближайших окрестностей водоема. Однако изменение метеорологических условий (превышение количества атмосферных осадков над испарением начиная с середины 1980-х годов) вызвало повышение уровня водоема, поэтому работы были приостановлены.

Потребовалась разработка новых проектных решений по консервации водоема с учетом изменившихся метеорологических условий. Была создана третья очередь проекта с учетом использования локальной геофильтрационной модели района оз. Карачай и выполнения базового прогнозного расчета изменения уровня В-9 [11].

Основными техническими мероприятиями были признаны: гидроизоляция закрытой части водоема, сооружение водоотводного нагорного канала и водоотводной канавы. Эти работы начались в 2005–2007 гг., когда площадь водоема снизилась с 11,6 до 7,8 га [14].

Полное закрытие водоема состоялось в 2015 г. по завершении третьей очереди (рис. 7).



Рис. 7. Окончательная стадия закрытия акватории озера Карачай (промышленного водоема В-9) на ПО «Маяк» 25.11.2015 г. (фото А. Лёшкина)

Следующий этап – серьёзная система мониторинга за подземным контуром вод, состоянием элементов засыпки. В перспективе ближайших

10–20 лет водоём будет переведен сначала из пунктов размещения в пункт консервации особых РАО, а затем в пункт захоронения особых радиоактивных отходов с выполнением всех технических и юридических требований. В водоёме Карачай локализовано и надёжно изолировано более 200 тыс. кубометров высокоактивных техногенных илов и слагающих ложе В-9 суглинков.

В настоящее время в рамках мероприятий ФЦП ЯРБ-2 выполняется необходимый комплекс работ по обеспечению безопасного состояния водоема В-9. Основу составляют работы по мониторингу состояния В-9 и окружающей среды. Наблюдаются параметры загрязнения радионуклидами атмосферного воздуха, подземных вод и поровой воды массива засыпки, почвы, растительности, снега; отслеживаются уровни подземных вод и поровой воды массива засыпки.

Начиная с 2016 г. выполняется геодезический мониторинг поверхности массива засыпки: работы проводятся с закладкой центров триангуляции и полигонометрии (пунктов наблюдения за деформациями) на массиве. Всего оборудовано 1090 пунктов контроля с последующим использованием установленных пунктов для определения координат и высот один раз в квартал.

Начиная с 2017 г. результаты геодезического мониторинга стали основой для построения моделей поверхности массива на базе геоинформационных систем. Результаты мониторинга свидетельствуют о достаточно безопасном состоянии системы: критических подъемов уровня воды в массиве засыпки не наблюдается, уровень воды находится в нескольких метрах от поверхности массива.

Основные радиационные параметры (плотности потока альфа- и бета-частиц, мощность эквивалентной дозы) ежемесячно измеряются в 37 пунктах контроля на поверхности массива засыпки. Наибольшие уровни МЭД наблюдаются на участке вблизи оголовка сбросной линии, где завершались работы по закрытию акватории водоема и где были сконцентрированы наибольшие мощности донных отложений. Измеренные здесь значения МЭД потребовали проведения дополнительной отсыпки наиболее радиационно опасных участков для снижения дозового воздействия на персонал и предотвращение загрязнения атмосферного воздуха.

В настоящее время результаты всех видов мониторинга свидетельствуют о безопасном состоянии всех систем бывшего открытого водоема-хранилища ЖРО [23].

Радиоэкология в Приморском крае: проблемы и их решения

Дальний Восток является форпостом Российской Федерации в Азиатско-Тихоокеанском регионе (АТР) в части обеспечения безопасности государства. Основными современными приоритетами Дальнего Востока сегодня становятся: развитие промышленно-хозяйственной и социально-экономической деятельности региона в условиях освоения сырьевых ресурсов, в том числе биоресурсов; создание новых рабочих мест и увеличение народонаселения в среде безопасного и комфортного проживания.

Для расширения экономической свободы и предоставления лучших условий ведения бизнеса для отечественных инвесторов возможно только в условиях обеспечения экологической и радиационной безопасности территории Приморского края [6].

Основными радиационными объектами Дальнего Востока являются:

подводные лодки (АПЛ) с ядерно-энергетическими установками (ЯЭУ);

надводные корабли (НК) с ЯЭУ;

суда атомного технологического обслуживания (АТО), в том числе, плавучие мастерские (ПМ), хранившие ранее отработавшее ядерное топливо (ОЯТ) и радиоактивные отходы (РАО);

береговые технические базы Военно-морского флота (БТБ ВМФ), в том числе судоремонтные заводы (СРЗ), где производится утилизация АПЛ, НК, и АТО, пункт временного хранения реакторных отсеков на плаву (ПВХ), береговой пункт длительного хранения РАО и аварийных АПЛ (ПДХ), а также радиоизотопные термоэлектрические генераторы (РИТЭГ) и иные источники ионизирующего излучения (ИИИ).

Первоочередными задачами гарантированного обеспечения их радиационной безопасности являются:

утилизация атомных подводных лодок (АПЛ) и надводных кораблей (НК) с ядерно-энергетическими установками (ЯЭУ);

реабилитация бывших береговых баз ВМФ, включая пункты временного хранения; вывод отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) АПЛ на переработку;

утилизация накопленных радиоактивных отходов (РАО);

обращение с радиационно-опасными объектами без утилизации.

Кроме того, в связи с опасностью использования ИИИ, радиоактивных материалов (РМ) и объектов с ядерными установками в террористических целях потребовалось решать задачи усиления физической защиты, осуществления радиационного мониторинга и аварийного реагирования.

Утилизация АПЛ. Вывод АПЛ из состава ВМФ с последующей комплексной утилизацией начался в 1986 году. Предполагалось завершить вывод всех АПЛ устаревших проектов, выслуживших установленные сроки, в течение 5–6 лет.

В ходе работы, уже к 90-м годам XX века стало ясно, что промышленность не готова к выполнению поставленных планов, и утилизационные работы превратились в задачу государственного масштаба. Лавинообразное накопление в процессе утилизации АПЛ и НК большого числа радиационно-опасных объектов (ЯЭУ, ОЯТ, РАО) представляло угрозу для окружающей среды [7].

Уже к концу 1997 г. во всех пунктах отстоя находилось уже 157 АПЛ, большая часть которых хранилась с ОЯТ на борту, а более 30 имели повреждения с потерей плавучести. Скорость утилизации составляла 2 АПЛ в год, а стоимость её содержания 4–5 млрд руб. в год (в ценах 1997–1998 гг.). Объемы же накопленных ОЯТ и РАО превышали возможности мест хранения, а состояние объектов хранения не соответствовало изменившимся требованиям безопасности.

С учетом активного вывода АПЛ из состава ВМФ можно было оценить срок завершения процесса от 40 лет [8]. С 1998 г. постановлением Правительства РФ все функции государственного заказчика по комплексной утилизации АПЛ и НК, реабилитации БТБ были делегированы ГК «Росатом».

Благодаря самоотверженной и высокопрофессиональной работе персонала предприятий периметра ГК «Росатом», ученых ДВО РАН и ВУЗов поставленные выше задачи были выполнены полностью. К 2017 г. из 203 выведенных из состава АПЛ ВМФ 197 уже утилизировано (с выгрузкой ОЯТ из реакторов), две находятся в стадии утилизации. На Дальнем Востоке начаты работы по утилизации большого атомного разведывательного корабля «Урал» и судна АТО «ПМ-124».

Обращение с реакторными отсеками. Обеспечение долговременного хранения реакторных отсеков, списанных АПЛ – одно из важных

направлений работ по ядерной и радиационной безопасности, связанных с ликвидацией наследия.

Технология их переработки на Дальнем Востоке состояла в герметизации, покрытием защитным составом и транспортировке в бухту Разбойник для контролируемого хранения в надводном положении. В дальнейшем блок извлекался из воды, боковые отсеки отрезались, реакторный отсек ставится на длительное 70-летнее хранение на береговую площадку.

По состоянию на 2017–2018 гг. в пункте долговременного хранения «Устричный» в Приморском крае предстоит разместить на долговременное хранение 24 реакторных отсека списанных АПЛ. В 2017 г. стартовал не имеющий аналогов в мире проект по единовременной транспортировке 12 из 24 трехотсечных блоков АПЛ из Камчатского края в приморскую бухту Разбойник для разделки и долговременного хранения.

Переработка ОЯТ АПЛ. Завершен проект по выводу к месту переработки отработанного ядерного топлива (ОЯТ) на Дальнем Востоке, что позволило ликвидировать потенциальную угрозу экологических и техногенных аварий в регионе. Всего за период 2002–2014 гг. с Приморского края полностью вывезен 41 эшелон с ОЯТ суммарной активностью 84 млн кюри.

Обращение с РАО. Жидкие радиоактивные отходы, содержащие морскую воду (ЖРО с МВ), возникают в процессе эксплуатации, ремонта и утилизации судов с ядерными энергетическими установками (ЯЭУ) в чрезвычайных ситуациях, а также при авариях на АЭС, расположенных в прибрежной зоне.

Сложность переработки ЖРО, содержащих МВ, главным образом определяется тремя факторами: высоким солесодержанием вплоть до 30 г/л; сложным радионуклидным составом, содержащим трудноизвлекаемые радионуклиды, и высокой активностью требующие меры по обеспечению защиты персонала на производстве. Особенности химического состава ЖРО с МВ связаны с ограничением выбора отработанных на практике методов обращения с ними: дистилляция, обратный осмос и ионный обмен за счет высокого солесодержания. В настоящее время накоплен значительный опыт по обращению с ЖРО с МВ на Дальнем Востоке РФ [27, 30]. Рассмотрим проблемы сорбционного выделения отдельных радионуклидов из ЖРО, содержащих МВ. Технологии выделения радионуклидов цезия-137 из ЖРО с МВ содержат как ионообменные, так и мембранные методы. На первой стадии в связи с низкими коэффициентами очистки от радионуклидов цезия

технология требует использование селективных сорбентов. Как правило, применяются ферроцианидные сорбенты, обладающие наибольшей селективностью к радионуклидам цезия на фоне больших концентраций ионов натрия и калия. Различного рода цеолиты и цеолитоподобные сорбенты, к сожалению, показывают значительно меньшие коэффициенты разделения в морской воде и не могут обеспечить глубокую очистку морской воды от радионуклидов цезия. Применение таких материалов для одностадийной очистки ЖРО с МВ от радионуклидов цезия возможно лишь при невысокой активности отходов. В последнее время все большее значение стали приобретать селективные фенол- и резорцинформальдегидные смолы [29, 19], имеющие высокую селективность к радионуклидам цезия в области больших значений pH. Существенным преимуществом данных материалов является то, что сорбция радионуклидов цезия на них обратима и десорбцию можно легко осуществить резким снижением pH регенерирующего раствора. Для выделения стронция-90 наиболее перспективными сорбентами считаются кристаллические силикотитанаты, обладающие большой емкостью по отношению к Са и Sr и получаемые методом гидротермального синтеза [29]. Для решения проблемы удаления Sr из МВ также используют сорбционно-реагентные системы на основе аморфного силиката бария $BaSiO_3$ [2], который получается в результате золь-гель перехода, индуцированного введением ионов Ba^{2+} в раствор Na_2SiO_3 . Образующиеся высокопористые матрицы содержат большое количество обменных Ba^{2+} , способных образовывать нерастворимые осадки $BaSO_4$ с SO_4^{2-} -анионами, содержащимися в МВ. Изменение условий золь-гель перехода и введение в золь модифицирующих добавок позволяет варьировать свойства получаемых матриц. Реакция $BaSiO_3$ с SO_4^{2-} -ионами МВ приводит к значительному изменению селективности извлечения Sr из растворов, содержащих ионы Са [25]. К недостаткам $BaSiO_3$ относится низкая гидромеханическая прочность при использовании в качестве фильтрующего материала. Решением проблемы является получение композиционного материала, в котором активный компонент ($BaSiO_3$) переводится в гранулированную форму. Для комбинированного извлечения радионуклидов Cs и Sr с высокими коэффициентами очистки из МВ используют композиционный материал на основе $BaSiO_3$ и резорцинформальдегидных смол в качестве [18]. Эффективная очистка МВ от данных радионуклидов возможна методами соосаждения, например с

гидратированной двуокисью марганца. Описана сорбционно-реагентная система на основе активированных углеродных волокон и перманганата, дозируемого в МВ, позволяющая организовать очистку в динамическом режиме, исключая осадительные ёмкости. Таким же образом можно организовать очистку МВ от частиц топливной композиции и радиоколлоидов трансураниевых элементов (ТУЭ). Однако у данного варианта наличествуют ограничения, связанные с возрастанием гидродинамического сопротивления колонки. В некоторой степени это ограничивает возможности метода для случаев, когда требуется не только высокая степень очистки ЖРО с МВ, но их большие соотношения к объему образующихся твердых радиоактивных отходов (ТРО).

Опыт переработки ЖРО, содержащих МВ, на предприятиях Дальнего Востока РФ. На ряде объектов, связанных с переработкой ЖРО, образующихся при эксплуатации, ремонте и утилизации надводных кораблей и подводных лодок с ЯЭУ Дальнего Востока РФ, проводились испытания различных технологий переработки ЖРО, содержащих МВ. Технологии были реализованы на ряде крупных технических проектов и опытных установках [2, 3, 26]. Так на станции переработки радиоактивных веществ (СПРВ), смонтированной в 1995 г. на техническом танкере «Пинегга», реализована следующая принципиальная технологическая схема очистки ЖРО (разработка ВНИИПИЭТ, С.-Петербург). Данная схема была опробована на ЖРО, содержащих до 10 % МВ, но в связи с трудностями эксплуатации установка в дальнейшем была законсервирована. Особенностью работы технологической схемы установки «Ландыш» (разработка В&W NE, USA, 1999) явился полный цикл обращения с ЖРО, включающий их кондиционирование (цементирование) и упаковку вторичных радиоактивных отходов, образующихся в результате переработки. Опытные испытания, выполненные на ЖРО, содержащих 50 % МВ, показали общее сокращение объемов РАО при переработке ЖРО до ТРО в 14 раз. Однако заложенные при проектировании ограничения по ёмкости фильтров предварительной очистки, а также ограничения биологической защиты оборудования, не позволяют перерабатывать ЖРО с активностью $>10^5$ Бк/л. Кроме того, высокое содержание Cl^- -ионов в МВ требует специальной тары для хранения отвержденных концентратов выпарной установки. К настоящему времени на упомянутой установке удалось переработать $>3000 \text{ м}^3$ ЖРО с МВ. С

использованием установки «Шарья» (разработка АО «Экоатом», г. Сосновый Бор) на различных типах ЖРО с МВ с 1993 по 2000 г. было переработано >5000 м³ ЖРО с низкой соленостью. Отличие технологической схемы от вышеупомянутой состоит в отсутствии стадии выпарки рассолов, приведшей к накоплению в ходе эксплуатации >1000 м³ ЖРО – обратноосмотического концентрата соленостью от 30 г/л и активностью >10⁶ Бк/л. Их переработка, а также утилизация ЖРО с МВ на Дальнем Востоке РФ привели к разработке установки «Барьер», в которой применены новые сорбционно-реагентные материалы и селективные сорбенты (разработка ИХ ДВО РАН).

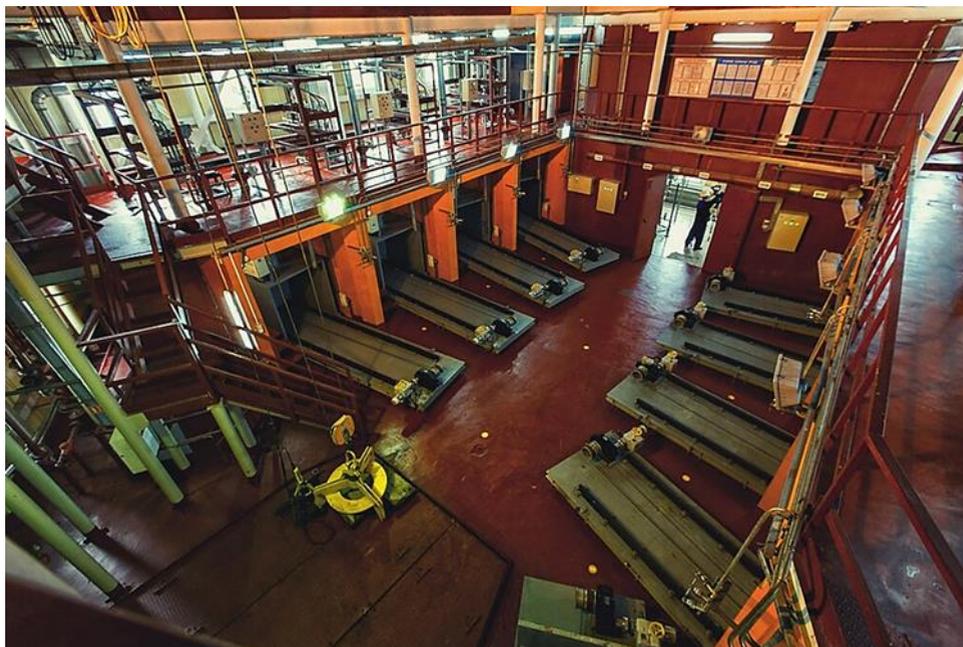


Рис. 8. Комплекс переработки ЖРО на площадке отделения Фокино Дальневосточного центра по обращению с радиоактивными отходами (ДВЦ «ДальРАО») филиала ФГУП «РосРАО» ГК «Росатом». На предприятии используется исключительно отечественное оборудование и сорбционные материалы, разработанные в Институте химии ДВО РАН (фото РИА PrimaMedia)

На стадии предварительного снижения гамма-активности используются природные цеолиты, полная очистка от радионуклидов Cs происходит на ферроцианидных фильтрах, очистка от радионуклидов кобальта и ТУЭ – на сорбционно-реагентных фильтрах с дозировкой в ЖРО KMnO_4 . Основной

фильтрационный узел, связанный с удалением радионуклидов Sr, основан на фильтрах, заполненных сорбционно-реагентным материалом на основе BaSiO_3 . На установке «Барьер» с 2000 г. по настоящее время переработано $>5000 \text{ м}^3$ накопленных ЖРО с МВ различного состава, а также концентраты.

Опыт промышленной переработки ЖРО с МВ и концентратов установки обратного осмоса, полученный на АО «ДальРАО» в период с 2000 по 2012 г., позволяет считать, что наиболее успешным является технология селективной сорбции, позволяющая очищать ЖРО с активностью до 10^7 Бк/л до норм, позволяющих сбрасывать очищенные воды в акваторию ($<10^2$ Бк/л по ^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{60}Co ; $<0,1$ Бк/л по ТУЭ). При этом используются ферроцианидные сорбенты и сорбционно-реагентные материалы, производимые ДВЦ «ДальРАО» по технологии, разработанной в Институте химии ДВО РАН (рис. 8).

Литература

1. Абрамов А.А. Ликвидация ядерного наследия: 2008–2015 годы / Под общей редакцией Абрамова А.А., Крюкова О.В., Линге И.И. М.: Изд-во ОАО «Энергопроманиалитика», 2015. – 182 с.
2. Авраменко В.А. Сорбционно-реагентные материалы для переработки жидких радиоактивных отходов / Авраменко В.А., Бурков И.С., Глушенко В.Ю., Голиков А.П., Железнов В.В., Каплун Е.В., Паламарчук М.С., Сергиенко В.И., Соколицкая Т.А., Юхкам А.А. // Вестник ДВО РАН, 2002, №3. С. 7–21.
3. Авраменко В.А. Технологии переработки жидких радиоактивных отходов, содержащих морскую воду / Авраменко В.А., Егорин А.М., Папынов Е.К., Соколицкая Т.А., Тананаев И.Г., Сергиенко В.И. // Радиохимия, 2017, т. 59, № 4. С. 355–360.
4. Авраменко В.И. Развитие радиэкологических исследований на Дальнем Востоке: проблемы и решения / Авраменко В.И., Тананаев И.Г., Сергиенко В.И. В кн.: Сборник тезисов на IX Российской конференции с международным участием «Радиохимия 2018». С.-Петербург, 17–21 сентября 2018., Изд-во АО Радиового института, 2018. – С. 54.
5. Алексахин А.И. История эксплуатации водоема Карачай. Обзорный очерк по архивным и отчетным материалам ПО «Маяк» / Вопросы радиационной безопасности, 2005. № 4. С. 42 – 50.
6. Анисимов Н.Ю. Развитие и роль радиэкологии на Дальнем Востоке: проблемы и решения / Анисимов Н.Ю., Голохваст К.С., Тананаев И.Г. // Вопросы радиационной безопасности, 2017, № 4. С. 3–9.
7. Антипов С.В. Радиэкологические последствия эксплуатации и утилизации объектов атомного флота в Дальневосточном регионе / С.В. Антипов, В.Д. Ахунов, В.П. Биладенко и др. Под ред. А.А. Саркисова. ИБРАЭ РАН. – М., 2010. – 388 с.

8. Ахунов А.Д. Двадцать лет упорного труда / Бюллетень ЗАО «Атомэнергоиздат», 2009, № 1 (17) «Вопросы утилизации АПЛ». С. 18–26.

9. Белкин Д.Ю. Концепция по выводу из эксплуатации промышленных уран-графитовых реакторов (ПО «Маяк») / Белкин Д.Ю., Иванов И.А., Тананаев И.Г. // Вестник ДВО РАН, 2016, № 3. С. 50–57.

10. Иоффе Б.Л. История науки: атомные проекты. Монография для вузов / 2-е изд., перераб. и доп. – М.: ЮРАЙТ, 2020. – 191 с.

11. Баторшин Г.Ш. Концепция вывода из эксплуатации поверхностных водоемов хранилищ ЖРО ПО «Маяк» / Баторшин Г.Ш., Мокров Ю.Г. // Безопасность ядерных технологий и окружающей среды, 2013, № 3–4. С. 88–94.

12. Егоров Н.Н. Состояние проблемы обращения с радиоактивными отходами и отработавшим ядерным топливом в России // Вопросы радиационной безопасности, 1997, № 4. – С. 3–8.

13. Глаголенко Ю.В. Современное состояние и обеспечение вывода из эксплуатации водоемов-хранилищ жидких среднеактивных отходов - озера Карачай и хранилища Старое Болото / Глаголенко Ю.В., Дрожко Е.Г., Мокров Ю.Г. // Вопросы радиационной безопасности, 2003, № 1. С. 14–19.

14. Глинский М.Л. Озеро Карачай: объектный мониторинг при выводе из эксплуатации / Глинский М.Л., Глаголева М.Б., Дрожко Е.Г., Иванов И.А. // Безопасность ядерных технологий и окружающей среды, 2009, № 4. С. 96–99.

15. Глаголенко Ю.В. Стратегия обращения с радиоактивными отходами на производственном объединении «Маяк» / Глаголенко Ю.В., Дзекун Е.Г., Дрожко Е.Г. // Вопросы радиационной безопасности, 1996, № 2. С. 3–11.

16. Дрожко Е.Г. Водоем-9 – хранилище жидких радиоактивных отходов и воздействие его на геологическую среду / Под ред. Дрожко Е.Г., Самсонов Б.Г. – М.: Росатом, 2007. – 250 с.

17. Дрожко Е.Г. Современное состояние подземной гидросферы в районе ПО «Маяк» / Дрожко Е.Г., Иванов И.А., Алексахин А.И., Самсонова Л.М., Глаголев А.В. // Вопросы радиационной безопасности, 1996, № 1. С. 11–19.

18. Егорин А.М. Композитные селективные сорбенты для очистки морской воды от радионуклидов цезия и стронция / Егорин А.М., Сокольницкая Т.А., Тутов М.В., Токарь Э.А., Матвейкин М.Ю., Авраменко В.А. // Доклады РАН, 2015, т. 460, № 2. С. 177–181.

19. Егорин А.М. Извлечение ^{137}Cs из морской воды с использованием резорцинформальдегидной смолы / Егорин А.М., Паламарчук М.С., Токарь Э.А., Тутов М.В., Азарова Ю.А., Тананаев И.Г., Авраменко В.А. // Радиохимия, 2017, т. 59, № 2. С. 142–146.

20. Иванов И.А. Миграция урана и трансурановых элементов в подземных водах района размещения открытого хранилища жидких радиоактивных отходов оз. Карачай (ПО «Маяк», Челябинская область). Автореф. дис. канд. тех. наук. – Озерск, 2004. – 28 с.

21. Кузнецов В.М. Радиационное наследие холодной войны: опыт историко-научного исследования / Кузнецов В.М., Назаров А.Г. ИИЕТ им. С.И. Вавилова РАН. – М.: Ключ-С, 2006. – 470 с.
22. Мартынов К.В. Использование глинистых материалов для создания защитных барьеров радиационно-опасных объектов / Мартынов К.В., Захарова Е.В., Дорофеев А.Н. // Радиоактивные отходы, 2020, № 3. – С. 39.
23. Мокров Ю.Г. Мониторинг – основа обеспечения безопасности при выполнении работ по консервации водоема Карачай / Мокров Ю.Г., Алексахин А.И. // Радиоактивные отходы, 2018, № 3–4. С. 60–68.
24. Садовников В.И. История атомной промышленности СССР / Садовников В.И., Жаров А.П. Сборник научных статей. ПО «Маяк». – Озёрск, 2000. – 157 с.
25. Сокольницкая Т.А. Образование осадка при поглощении стронция сорбционно-реагентными материалами / Сокольницкая Т.А., Авраменко В.А., Бурков И.С., Голиков А.П., Железнов В.В., Каплун Е.В., Паламарчук М.С., Сергиенко В.И., Юхкам А.А. // Журн. физ. химии, 2004, т. 78, № 3. С. 497–502.
26. Тананаев И.Г. Радиационная безопасность Дальнего Востока: проблемы и решения / Тананаев И.Г., Авраменко В.А. // Журнал Белорусского государственного университета. Экология, 2017, № 4. С. 33–39.
27. Avramenko V.A., Hydrothermal reprocessing of liquid radwastes from nuclear power plants / Avramenko V.A., Voit A.V., Golub A.V., Dobrzanski V.G., Egorin A.M., Maiorov V.Yu., Sergienko V.I., Shmatko S.I., Korchagin Yu.P. // Atomic Energy, 2008. Vol. 10, № 2. P. 150–154
28. Choppin G.R. Chemical Separations in nuclear waste management. The state of art and a look to the future / Choppin G.R., Khankhasayev M.K., Plendl H.S. Battl Press. DOE/EM-0591, 2002. – 96 p.
29. Hassan N.M. Resorcinol - formaldehyde adsorption of cesium from Hanford waste solutions / Hassan N.M., Adu-Wusu K., Marra J.C. // Radioanal. and Nucl. Chem., 2005, vol. 262, № 3. P. 579–586.
30. Zhelezov V.V. Application of fibrous carbon ferrocyanide sorbents for removing cesium and cobalt from large volumes of sea water / Zhelezov V.V., Vysotskii V.L // Atomic Energy, 2002, vol. 92, № 6. P. 493–500.

Н.С. Бортников¹, В.А. Петров², Г.А. Машковцев³, И.Г. Печенкин⁴

МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВАЯ БАЗА АТОМНОЙ ОТРАСЛИ⁵

Вехи становления сырьевой базы урана России

5 марта 1938 года Председателю Совнаркома СССР В.М. Молотову было направлено письмо, подписанное А.Ф. Иоффе, И.В. Курчатовым, А.И. Алихановым, Д.В. Скобельцыным, Л.А. Арцимовичем и др., в котором говорилось, что за последние годы исследования в области атомного ядра развивались весьма интенсивно и за короткий период сделаны исключительной важности открытия. Однако о практическом использовании атомной энергии пока еще нет и речи [1].

Великое время рождает великих провидцев, способных охватить умом хитросплетенье текущих событий и проецировать их в будущее. Среди них были академики В.И. Вернадский и В.Г. Хлопин. В июне 1940 года они направляют в АН СССР Записку, в которой говорится: *«Нам кажется, что уже сейчас ... в СССР должны быть приняты срочные меры к формированию работ по разведке и добыче урановых руд и получения из них урана. Это необходимо для того, чтобы ... мы располагали необходимыми запасами этого драгоценного источника энергии. Между тем в этом отношении положение в СССР в настоящее время крайне неблагоприятно. Запасами урана мы совершенно не располагаем. Это – металл, в настоящее время крайне дефицитный. Производство его не налажено. Разведанные мощные месторождения ... на территории СССР пока не известны. Разведки известных месторождений и поиски новых производятся темпами совершенно недостаточными и не объединены общей идеей...»* [1].

Реакция на Записку была стремительной. 16 июля 1940 г. она была рассмотрена в Президиуме АН СССР, а уже 30 июля в АН СССР создается Комиссия по проблеме урана, в которую вошло 10 академиков – Хлопин, Вернадский, Иоффе, Ферсман, Вавилов, Лазарев, Фрумкин, Мандельштам,

¹ Научный руководитель ИГЕМ РАН, академик РАН.

² Директор ИГЕМ РАН, член-корреспондент РАН.

³ Научный руководитель Всероссийского НИИ минерального сырья им. Н.М. Федоровского, профессор, доктор геолого-минералогических наук.

⁴ Советник генерального директора Всероссийского НИИ минерального сырья им. Н.М. Федоровского, доктор геолого-минералогических наук.

⁵ По материалам доклада на заседании общего собрания ОНЗ РАН.

В 1914–1916 годах Радиевая экспедиция Российской академии наук провела исследования в разных районах страны на предмет выявления урановых месторождений. Проверив имевшиеся сведения о находках радиоактивных минералов в Забайкалье, на Кавказе и Урале, экспедиция новых месторождений не выявила, констатируя, что все находки имеют лишь минералогический интерес.

Наряду с этим ведущие ученые-геологи страны В.И. Вернадский, А.Е. Ферсман, Д.И. Щербаков и др. считали, что территория нашей страны характеризуется огромным количеством различных геологических обстановок, среди которых должны быть и такие, которые способствовали концентрации радиоактивных элементов в крупные месторождения, что и предопределяло необходимость организации поисков.

Это было время зарождения радиогеологии как самостоятельной области геологической науки. Ее основоположником по праву считается выдающийся русский ученый В.И. Вернадский. В его фундаментальных трудах проанализированы роль и место радиоактивности в материальном мире, природных процессах и общественной сфере, приведены первые данные о радиоактивных минералах и их месторождениях. Уже в 1910 г. В.И. Вернадский подчеркивал настоятельную необходимость постановки ширококомасштабных работ по исследованию радиоактивных минералов в России. В 1930-е и в начале 1940-х годов идеи В.И. Вернадского получили развитие в работах А.Е. Ферсмана и И.Ф. Григорьева, изучавших условия формирования урановых месторождений.

Кардинальное ускорение темпов развития радиогеологии произошло в середине 1940-х годов, когда стали очевидными гигантские энергетические возможности явления радиоактивного распада. В этот период значительный вклад в становление радиогеологии внесли ученые РАН: С.С. Смирнов, Д.И. Щербаков, А.П. Виноградов, А.Г. Бетехтин, А.А. Сауков, В.В. Щербина, М.Ф. Стрелкин, В.Н. Герасимовский, Ф.И. Вольфсон. Усилиями этих ученых и руководимых ими научных коллективов, а также других научно-исследовательских и производственных организаций, в кратчайшие сроки были созданы основы теории уранового рудообразования, что явилось прочной научной базой для интенсивного наращивания сырьевого потенциала урана в СССР [11].

В предгрозовое для страны время ученые-геологи работают над выделением перспективных районов для поисков месторождений урана. Вся информация стекается к академику А.Е. Ферсману. Он выступает экспертом Правительства и на документах по урану всегда стоит его подпись. После своего отчета о поездке в Среднюю Азию 12 декабря 1940 г. он пишет в Совнарком СССР: *«В период нашего объезда ряда месторождений Ферганской котловины и северного Тянь-Шаня ... мы неоднократно обращали внимание на исключительные запасы ряда месторождений (особенно в связи со специальными редкими металлами), имеющими большое промышленное и оборонное значение. Некоторые из этих месторождений, как, например, Майли-Су (уран), Акджелга (кобальт), Актюс (цинк, индий, торий), Куперли-Сай (торий), представляют ... исключительное значение Месторождение Майли-Су настолько серьезно по своим запасам, что промышленное его значение является доказанным...»* [1].

1940 г. стал своеобразным рубежом в создании ядерного оружия. Один за другим стартуют атомные проекты:

январь 1940 г. (германский «Урановый проект»);

май 1941 г. (японский «Проект Ни»);

сентябрь 1941 г. (Великобритания, «Тьюб эллоуз»);

6 декабря 1941 г. (США, «Манхэттенский проект»);

28 сентября 1942 г. – распоряжение Государственного Комитета Обороны (ГКО) № 2352 «Об организации работ по урану»;

август 1943 г. – объединение атомных проектов США и Великобритании.

Первое испытание атомного оружия прошло в США 16 июля 1945 г.

С ноября 1942 г. научный руководитель «Атомного проекта» И.В. Курчатов получает разведанные о работах атомной лаборатории США и ставит конкретные задачи нашим разведчикам.

В 1942 г. в СССР возобновились научные исследования в области изучения радиоактивных материалов. Они не предусматривали использования их в военных целях. И только в феврале 1943 г. И.В. Сталин подписывает постановление Правительства об организации работ по использованию атомной энергии в военных целях. В.М. Молотову было поручено возглавить эту работу. Нарком внутренних дел Л.П. Берия был назначен его заместителем, отвечающим за обеспечение ученых и военных информацией по атомной проблематике, получаемой по линии внешней разведки.

С момента возобновления работ с радиоактивными элементами ученые столкнулись с нехваткой в стране расщепляющихся материалов. В связи с этим в ноябре 1942 г. ГКО СССР издает постановление «О добыче урана». В нем предписано Наркомату цветной металлургии (П.Ф. Ломако) организовать добычу и переработку урановых руд с получением солей урана на Табошарском заводе Главредмета в Средней Азии. Одновременно предлагалось закончить в 1943 г. разведочные, изыскательские и исследовательские работы на урановых месторождениях Майлису и Уйгурсай в Ферганской долине. Комитету по делам геологии при Совнаркоме СССР (И.И. Малышев) предлагалось организовать геологоразведочные работы (ГРР) по выявлению новых месторождений урана [1, 9].

Однако в условиях продолжавшейся войны выполнение задания по развертыванию ГРР на уран шло медленно. В марте 1943 г. академик В.И. Вернадский направляет в Правительство записку, в которой указывает на слабое развитие ГРР на уран, а также на то, что делом первостепенной важности должна стать организация систематических поисков новых месторождений и на их базе добыча достаточного количества урановых руд.

Важным практическим шагом в решении проблемы отечественной сырьевой базы урана стало распоряжение ГКО № 3834сс от 30 июля 1943 года «Об организации геологоразведочных работ, добычи урана и производства урановых солей». В этом документе, в частности, предписывалось создать при Всесоюзном научно-исследовательском институте минерального сырья (ВИМС) специальный сектор, на который возложить обобщение материалов по поискам, разведке и изучению радиоактивного минерального сырья, научно-методическое руководство этими работами и детальное минералогическое и технологическое изучение руд урана и других радиоактивных элементов.

Для реализации этого задания в ВИМСе в августе 1943 г. был создан специальный сектор № 6 (начальник Д.И. Щербаков, с 1944 г. – М.Н. Альтгаузен). К работе были привлечены ведущие специалисты в области урановой геологии того времени: В.И. Баранов, С.В. Культиясов, В.И. Спицин, В.И. Герасимовский, Я.Д. Готман, В.Г. Мелков, А.И. Сулоев и другие (рис. 2) [11].

В этот период в ВИМСе создавались основы прогнозирования и поисков промышленных месторождений урана, изучались известные и вновь

открываемые месторождения, разрабатывалась радиометрическая аппаратура и аналитические методы определения урана, проводились технологические исследования. При секторе № 6 были созданы производственные геологоразведочные экспедиции, работавшие на уран.

Поиски урана в середине 1940-х гг. начинались практически с чистого листа, и эти экспедиции явились настоящей кузницей кадров крупных ученых, организаторов производства, первооткрывателей месторождений, лауреатов Ленинской и Государственной премий.



Рис. 2. Сектор 6 (ВИМС). Научный руководитель – д.г.-м.н., профессор Дмитрий Иванович Щербаков (слева), заведующий – д.г.-м.н., профессор Михаил Николаевич Альтгаузен

8 апреля 1944 г. вышло постановление ГКО, обязывающее все геологические организации приступить к поискам радиоактивных руд. В мае того же года в геологических управлениях различных министерств и ведомств были созданы специальные группы, отряды и партии, которые начали, прежде всего, массовую ревизию коллекций горных пород, руд и керн буровых скважин, а также массовый промер радиоактивности образцов пород и руд, отобранных на действующих рудниках, разведываемых месторождениях и при проведении ГРП различного назначения.

В декабре 1944 г. ГКО принял решение создать в Средней Азии уранодобывающий Комбинат № 6 на базе семи рудников и пяти заводов. Строительство комбината курировали лично Л.П. Берия и его заместитель генерал А.П. Завенягин. В задачу Комбината входила доразведка известных месторождений и добыча металла. Проведение поисковых работ в районе первоначально было поручено территориальным геологическим управлениям Узбекистана и Таджикистана [9].

Уже в 1945 г. Комитет по делам геологии при Совнаркомом СССР принимает решение об организации в составе сектора № 6 ВИМСа специальной экспедиции, которой поручается проведение всех поисковых работ на уран в рассматриваемом районе. Экспедиция получила название Ферганской. Первым начальником ее был назначен Н.И. Нечаев, а впоследствии А.И. Кавалеров. С полевого сезона 1946 г. экспедиция приступила к работе, объединив в своем составе все партии, работавшие по урановой проблеме в Ферганском районе.

Зимой 1945 г. в помощь Комитету по делам геологии создается Научно-технический совет (НТС) для научно-методического руководства геологическими работами на уран. К работе НТС привлекаются известные геологи страны. Возглавил НТС в качестве Председателя С.С. Смирнов, его заместителем был П.М. Татаринов, членами Совета П.Я. Антропов, В.И. Баринов, Ю.А. Билибин, А.Н. Заварицкий, И.Е. Старик, Н.С. Шатский. В 1947 г. в Совет были дополнительно включены В.И. Смирнов (заместитель Председателя) и С.А. Ершов. Ученым секретарем назначается М.Н. Альтгаузен. В работе Совета постоянно принимали участие И.И. Малышев, С.В. Горюнов, И.Ф. Григорьев, Д.И. Щербаков и др.

В октябре 1945 г. было принято Постановление Совета народных комиссаров (СНК) СССР и издан соответствующий приказ Комитета по делам геологии об организации в Ленинграде на базе Геофизического сектора ВСЕГЕИ «Всесоюзного научно-исследовательского института разведочной геофизики» (ВИРГ) с возложением на него роли ведущей организации по разработке аппаратуры и геофизических методов поисков и разведки месторождений радиоактивных руд.

Непосредственными организаторами Института стали его первый директор, известный геофизик первооткрыватель Курской магнитной

аномалии профессор А.А. Логачев, его заместители В.А. Шпак и Л.Д. Берсудский.

Вскоре стало ясно, что созданная система управления ГРР на уран не дает необходимого эффекта. В связи с этим 13 октября 1945 г. СНК СССР принимает постановление «О концентрации и специализации поисково-разведочных работ на радиоактивное сырье». Этим постановлением в составе тогдашнего Госкомитета по геологии было создано Первое Главное геологоразведочное управление (Первый Главк), призванное решить проблему обеспечения сырьем зарождающуюся атомную промышленность. Постановлением определялись беспрецедентно высокие темпы развития ГРР на уран. Уже к апрелю 1946 г. предусматривалось организовать 270 специализированных полевых геологических партий, охватив ревизионными и поисковыми работами практически всю страну.

Во главе нового Главка были поставлены известные специалисты, имевшие большой практический опыт проведения геологических работ: С.В. Горюнов – талантливый геолог, организатор советской геологической службы (в последствии министр геологии СССР) и академик АН СССР И.Ф. Григорьев – крупнейший геолог, ученый в области рудных месторождений (директор Геологического института АН СССР (1941–1942), заместитель председателя Комитета по делам геологии при СНК СССР (1939–1946) [7].

Летом 1946 года положение с обеспеченностью «Атомного проекта» ураном было крайне неудовлетворительно. Его требовалось много, даже очень много, но известных и разведанных месторождений было мало. Приходилось использовать все, что было возможно. Л.П. Берия обращается к И.В. Сталину с запиской о выявлении в 1945–1946 годах на территории Эстонской ССР и Ленинградской области месторождений урансодержащих диктионемовых сланцев и проектом постановления «Об организации комбината № 7 Первого главного управления при Совете Министров СССР». И.В. Сталин подписывает это постановление.

Летом 1946 года начало создаваться это предприятие, в задачу которого сразу же было поставлено получение не только урана, но и ванадия, никеля, молибдена и других металлов [1].

Также была создана специальная Саксонская комплексная геологоразведочная экспедиция, которой было поручено выявить в районе

Иогангенштадта наиболее перспективные объекты для ГРР на уран и установлен план производства урана по Саксонскому горному управлению на 1946 г. в штуфной руде в количестве 2 т.

Год спустя после Хиросимы и Нагасаки высшее руководство «Атомного проекта» (Б.Л. Ванников, И.В. Курчатов, М.Г. Первухин, И.И. Малышев, И.К. Кикоин) направляет Л.П. Берии отчет о состоянии работ: *«В 1946 году геолого-поисковыми работами месторождений урана занято около 320 партий в районах Средней Азии, Казахстана, Кавказа, Сибири, Дальневосточного края, Алтая, Украинской ССР, Урала. Приполярного и Полярного сектора СССР.... В Ферганской долине эксплуатируется 3 рудника, входящих в состав комбината № 6 Первого главного управления, там же подготавливаются к эксплуатации еще 2 рудника. Ферганские рудники ... за 1945 год добыли 5 000 тонн руды. В результате проведенной работы по реконструкции добыча руды ... в 1946 г. возрастет в 10 раз: за первое полугодие 1946 года добыто руды 15 000 тонн, в III квартале запланировано добыть 12 000 тонн. К 1 января 1947 года подготавливается мощность Ферганских рудников до 105 000 тонн руды в год...»* [1].

Масштабы работ впечатляют, но урана не хватает. А потому ведутся работы в Саксонии, в Чехословакии на Яхимовских рудниках и в Болгарии на Готенском месторождении. В 1946 году заграничным рудным предприятиям дано задание добыть 35 тонн урана в руде.

Для оказания научно-методической помощи в доразведке среднеазиатских месторождений 10 июня 1946 г. Специальным комитетом при Совнаркомом СССР было принято предложение о направлении в районы Средней Азии экспедиции Института геологических наук АН СССР. Возглавил ее член-корреспондент АН СССР А.А. Сауков. Научное руководство Среднеазиатской экспедиции (САЭ) было поручено профессору Д.И. Щербакову. На Табошарском месторождении была создана постоянная научная станция, филиалы которой находились практически на всех обрабатываемых месторождениях.

Главной задачей САЭ было детальное изучение геологии урановых месторождений с целью создания теории уранового рудообразования и разработки научно-обоснованного прогноза локализации руд. В составе САЭ были организованы проблемные группы, ставшие позднее лабораториями, и территориальные геологические станции в Узбекистане, Таджикистане,

Казахстане и Забайкалье. Это позволило осуществлять комплексный подход к изучению урановых месторождений на основе анализа геологических структур, петрографических, минералогических, геохимических, гидрогеохимических и других исследований. Вскоре были составлены первые капитальные научные труды по урановым месторождениям.

Расширение фронта работ вызвало необходимость в 1957 г. изменить название САЭ на Экспедицию № 1 ИГЕМ АН СССР. С 1952 по 1959 г. работами Экспедиции руководил академик АН СССР Ф.В. Чухров (директор ИГЕМ АН СССР с 1956 по 1988 г.), а в период 1959–1988 гг. профессор Ф.И. Вольфсон. Научными руководителями в разное время были Д.И. Щербаков, А.А. Сауков, Ф.В. Чухров, Н.П. Лаверов.

Следует отметить, что в период 1958–1966 гг. руководителем геологической станции Экспедиции № 1 в поселке Табошар (с 2012 г. – Истиклол) работал признанный лидер научной школы урановой геологии, выдающийся советский и российский геолог, вице-президент АН СССР (1988–1991 гг.) и РАН (1991–2013 гг.) академик Н.П. Лаверов (рис. 3).

В 1990-е гг. Экспедиция № 1 была преобразована в Редкометалльное отделение и, наконец, в Лабораторию радиogeологии и радиogeоэкологии имени академика Д.И. Щербакова.



Рис. 3. Академик РАН Николай Павлович Лаверов, лидер научной школы урановой геологии, выдающийся советский и российский геолог

В конце 1947 г. Министерство геологии СССР (Мингео СССР), так с 1946 г. стал называться Комитет по делам геологии при СНК СССР, меняет систему организации и управления работ на уран. По состоянию на 1 января 1948 г. все геологические подразделения Мингео СССР, проводящие работы на радиоактивное сырье, переводятся в непосредственное подчинение Первому Главку.

Создавалась система территориальных экспедиций. Приказами Мингео СССР от 3 ноября 1947 г. в составе Первого Главка были созданы следующие экспедиции: Березовская (г. Новосибирск), Волковская (г. Алма-Ата Казахской ССР), Громовская (г. Баку Азербайджанской ССР, с 1949 г. переведена в г. Ереван Армянской ССР), Ермаковская (пос. Карасуг, Тувинская АССР), Калининская (г. Красноярск), Кировская (г. Киев Украинской ССР), Красногорская (г. Ленинабад Таджикской ССР), Октябрьская (г. Ленинград), Сосновская (г. Иркутск), Шабровская (г. Свердловск). В подчинение Главку были переданы: Северо-Кавказское геологическое управление с Кольцовской экспедицией в г. Эссентуки, Киргизское геологическое управление в г. Фрунзе, Мангышлакская и Тувинская экспедиции ВСЕГЕИ, ВИМС [7].

В 1947 г. во ВСЕГЕИ создан Отдел специальных исследований во главе с членом-корреспондентом АН СССР Ю.А. Билибиным. Отделу поручалось вести научные разработки по определению перспектив различных регионов страны на возможность выявления месторождений радиоактивного сырья. Тогда же во ВСЕГИНГЕО был создан отдел радиогидрогеологических исследований во главе с А.А. Смирновым.

Через два месяца после испытания первой атомной бомбы (29 августа 1949 г.) перед И.В. Сталиным ложится подписанный Л.П. Берией документ, в котором сообщалось: *«...Намеченный план производства готовых изделий и плутония потребует увеличения действующих мощностей атомных заводов по производству плутония ... и увеличения мощности химико-металлургических заводов по производству металлического урана...»* [1].

В США к этому времени атомных боеприпасов было в десятки раз больше. Началась погоня за Америкой. К декабрю 1951 г. в Челябинске-40 работало уже пять «военных» атомных реакторов, через год вступил в строй шестой, потом еще один и еще... 12 августа 1953 г. на Семипалатинском полигоне была взорвана термоядерная бомба мощностью 400 килотонн. В феврале 1956 г. был

проведен ядерный взрыв в районе Аральска, причем бомба была доставлена к месту взрыва уже ракетой Р-5.

СССР первым в мире начал эру мирного использования ядерной энергии. 27 июня 1954 г. была запущена первая атомная электростанция в Обнинске мощностью 5 МВт (ее реактор был заглушен только в 2002 году), а уже в 1964 г. была введена в строй Белоярская АЭС мощностью 300 МВт.

Урана требовалось все больше и больше.

Прорывом в выявлении радиоактивных руд стали поиски с воздуха. В ВИМСе были разработаны научно-методические основы и первые технические средства аэрогамма-поисков урановых месторождений. Работы по созданию аппаратуры шли ускоренными темпами: с момента патентования прибора ЯГ-1 в декабре 1946 г. и до выпуска заводской серии прошло всего 4 месяца.

В апреле 1947 г. начались планомерные аэрогамма-поиски в СССР, в результате которых был выявлен ряд аномалий и открыты месторождения Учкудук, Серное, Меловое и ряд других [11].

Конец 1949 г. ознаменовался еще одним значимым решением Правительства в части развития сырьевой базы урана. Постановлением Совета Министров СССР из Первого Главного управления выделяется самостоятельное Второе Главное управление прямого подчинения Совету Министров СССР – сырьевое. Руководителем управления назначается П.Я. Антропов, а в его составе создаются Первое управление для руководства освоением отечественной сырьевой базы (начальник Н.Б. Карпов) и Отдел иностранных объектов для руководства развитием сырьевой базы урана в странах народной демократии (начальник В.И. Трофимов).

В результате проведения этих мероприятий к началу 1950-х гг. в стране создается четкая структура для организации поисков, разведки и освоения месторождений радиоактивных руд. Первый Главк Мингео СССР осуществляет руководство научно-методическими работами (с помощью ВИМС, ВИРГ, ВСЕГЕИ и спецотделений других институтов), а также системой производственных территориальных экспедиций.

В 1949 г. постановлениями Правительства в двух ведущих геологических ВУЗах страны – Московском институте цветных металлов и золота (МИЦМиЗ) и Московском геологоразведочном институте (МГРИ) создаются специальные факультеты по подготовке инженеров урановой специализации в широком

диапазоне от геологов и геофизиков до горняков, обогатителей и металлургов. К подготовке привлекаются лучшие преподавательские и научные кадры. На геологических факультетах читают лекции профессора В.И. Смирнов, Д.И. Щербаков, Г.А. Бетехтин, Ф.И. Вольфсон, М.Ф. Стрелкин и др. В последующем к подготовке специалистов подключаются другие ВУЗы страны: Ленинградский горный институт, Ленинградский государственный университет, Свердловский горный институт, Томский политехнический институт и др., а также Киевский и Старооскольский геологоразведочные техникумы.

К 1950-м годам произошел революционный сдвиг в технологии поисков и разведки урана, обусловленный внедрением в практику работ первых отечественных приборов – радиометров. Массовое их использование вскоре привело к целому ряду открытий.

В Северном Казахстане были обнаружены месторождения Маньбай, Ишимское, Балкашинское, Заозерное и определилась новая крупная урановорудная провинция. На базе этих открытий был создан Целинный горно-химический комбинат (ГХК) Минсредмаша СССР. В Южном Казахстане были выявлены месторождения Бота-Бурум, Курдай, Кызыл-Сай – сырьевая база для строительства Киргизского ГХК. В Кызылкумах было разведано месторождение урана Учкудук, положившее начало выявлению крупнейшей в мире Притяньшанской провинции урановых месторождений инфильтрационного типа. На ее сырьевой базе создается Навоийский ГХК. На Мангышлаке было обнаружено месторождение Меловое и еще ряд однотипных объектов, на базе которых был создан Прикаспийский ГХК [7].

К 1960-м годам дефицит урана в стране был преодолен. Весьма значительную часть его ресурсов составлял импорт из ГДР, Чехословакии, а также Румынии, Болгарии и Венгрии. Силами советских специалистов – геологов, геофизиков, горняков, научных работников, здесь были открыты крупнейшие месторождения Рудных гор: Шлема-Альберода, Пшибрам, Роннебургское рудное поле и месторождения Стражского блока [4].

Дальнейшее развитие атомной промышленности и энергетики страны требовало воспроизводства собственной сырьевой базы. Однако ресурс легко открываемых месторождений был практически исчерпан. Кроме того, в повестку дня были поставлены вопросы экономики, что сразу же вызвало озабоченность по качеству сырья – содержание урана на большинстве

известных месторождений отставало от показателей на месторождениях Восточной Европы и мира.

Новые задачи ставили перед геологической отраслью проблему разработки научных основ и прогрессивных технологий прогноза и поисков урановых месторождений, не выходящих на земную поверхность. Специалистами ИГЕМ АН СССР, ВИМСа, ВСЕГЕИ и других институтов были разработаны методы локального прогноза и глубинных поисков урановых месторождений.

Важную роль сыграла разработанная в ВИМСе совместно со Степной и Кировской экспедициями методика выявления «перекрытых» месторождений, применение которой существенно расширило МСБ урана Северного Казахстана и центральных районов Украины. В ВИРГе была разработана новая аппаратура, в т.ч. первые сцинтилляционные радиометры, гамма-спектрометры, каротажные станции и т.д.

Результаты научно-технического перевооружения отрасли не замедлили сказаться. 1960-е гг. оказались весьма «урожайными» годами урановой геологии. В 1961 г. в Центрально-Алданском районе Южной Якутии обнаружена крупная ураноносная структура – зона Южная. Позднее здесь был выявлен уникальный по своим масштабам Эльконский урановорудный район. К сожалению, качество руд оказалось рядовым, а географо-экономические условия района весьма сложными. По этим причинам район остается в числе резервных, хотя вопрос о его промышленном освоении поднимался несколько раз. Он остается актуальным и ныне.

В 1962 г. было открыто Стрельцовское месторождение в Забайкалье. Вскоре здесь был выявлен одноименный крупный урановорудный район. К концу 1960-х годов в забайкальской степи уже стояли первые дома нового города Краснокаменска и начал работать крупнейший в стране Приаргунский ГХК Минсредмаша СССР. На Украине было выявлено Мичуринское месторождение, а вскоре и Кировоградская группа месторождений (Ватутинское, Северинское, Центральное и др.), которые вдохнули жизнь в Восточный ГОК. В Северном Казахстане было обнаружено Грачевское, Косачинское и другие месторождения [9].

В конце 1950-х – начале 1960-х гг. коллективом специалистов ВИМСа, ИГЕМ АН СССР, ВСЕГИНГЕО и Краснохолмской экспедиции Первого главка на основе изучения Учкудукского месторождения была разработана геолого-

генетическая модель инфильтрационного уранового рудообразования, которая легла в основу прогноза и поисков урановых месторождений Притяньшанья.

В связи с этим новые открытия последовали одно за другим в различных провинциях: в Кызылкумской (Букинай, Сабырсай, Сугралы, Мейлысай, Лявлякан и др.), Сырдарьинской (Карамурун, Ирколь и др.), а позднее в Чу-Сарысуйской (Уванас, Канжуган, Мынкудук, Инкай, Буденовское и др.) [12, 9].

В те же 1960-е годы специалисты Минсредмаша СССР осуществили крупный технологический прорыв в методах добычи урана. Были разработаны и внедрены в производство системы извлечения урана из недр подземным выщелачиванием через скважины [6]. Себестоимость добычи урана при этом снижалась до 6 раз по сравнению с горным способом. Большинство месторождений инфильтрационного типа в Кызылкумах и Южном Казахстане (Учкудук, Букинай, Сугралы и др.) оказались более благоприятными для отработки методом скважинного подземного выщелачивания (СПВ), чем горным способом.

Для эффективного и согласованного решения важнейших научных и технических проблем в области геологии урана при ВИМСе в 1960 г. был создан межведомственный Координационный научно-технический совет (КНТС) по геологии урана, в состав которого вошли представители всех институтов, организаций и ведомств, занимающихся урановым сырьем, прежде всего институтов АН СССР. В задачи КНТС входило рассмотрение основных направлений, планов и результатов исследований НИИ и их увязка с задачами производственных организаций.

К началу 1970-х годов МСБ урана в стране по объемному показателю соответствовала всем возможным программам развития атомной промышленности и энергетики. Однако в качественном отношении полного решения проблемы добиться не удалось – месторождений богатых руд (за исключением Стрельцовского района) не было выявлено. Добыча урана из рядовых и относительно бедных руд при горном способе обходилась весьма дорого.

В начале 1980-х годов выявленные ресурсы урана в недрах страны стали сопоставимы с его суммарными ресурсами в ведущих странах-производителях, что обеспечило МСБ для развития энергетических и военно-промышленных программ в самых широких вариантах.

Всего в СССР за период с 1946 по 1990 годы было выявлено и разведано запасы урана, хватившего для обеспечения всех АЭС [3]. Страна произвела достаточное количество высокообогащенного оружейного урана, выковав надежный ядерный щит от любых посягательств.

Состояние сырьевой базы урана России

Балансовые запасы урана по состоянию на 01.01.2020 г. составляли 713,9 тыс. т, они заключены в недрах 53 месторождений. Кроме того, на 7 объектах учтены только забалансовые запасы. Основное количество российских запасов урана локализовано в недрах Сибири и Дальнего Востока (рис. 4).

Около половины (53,6%) запасов сосредоточено в золотоурановых рудах Эльконской группы месторождений в Республике Саха (Якутия). Содержание урана в них невысокое (в среднем 0,15%). Подготавливаемые к освоению месторождения Забайкальского края, важнейшими из которых являются объекты Стрельцовой группы с молибден-урановыми рудами в вулканитах, заключают 13,7% запасов урана. Основная их часть представлена запасами низкокачественных руд с концентрацией урана 0,033 0,208%.



Рис. 4. Основные месторождения урана и распределение его запасов и прогнозных ресурсов категории P1 по субъектам РФ, тыс. т (Источники: ГБЗ РФ, Сборник «Прогнозные ресурсы твердых и твердых горючих полезных ископаемых РФ»)

Экономически приемлемыми для освоения в современных условиях являются руды подготавливаемых к отработке месторождений Аргунское и Жерловое, в которых сосредоточено 40,9% запасов распределенного фонда [2].

В Республике Бурятия, где сосредоточено 4,9% российских запасов урана, расположены мелкие и средние по масштабу месторождения Хиагдинского рудного поля с бедными (среднее содержание урана 0,04%) рудами песчаникового типа, пригодными для добычи методом СПВ. Район имеет значительные перспективы по увеличению ресурсного потенциала.

Потребности атомной отрасли в урановом сырье (4,7–4,8 тыс. т в год) определяются его использованием на отечественных АЭС, экспортом ядерного топлива для зарубежных станций, построенных по советским и российским проектам, и различных ядерных материалов в объеме порядка 8 тыс. т в пересчете на природный уран.

Таким образом, суммарный объем видимого потребления урана в России в настоящее время составляет порядка 13 тыс. т урана в год. Этот объем обеспечивается производством на отечественных (около 3 тыс. т) и зарубежных (порядка 4,5 тыс. т) уранодобывающих предприятиях, а также вторичными источниками и складскими запасами [3].

Степень освоенности российской сырьевой базы урана относительно высокая – в разработку вовлечено 9,5% запасов, подготавливается к освоению и разведывается еще 61%, при этом на долю месторождений Стрельцовского рудного поля приходится 19% запасов.

В нераспределенном фонде остается только 30% балансовых запасов. Основная доля запасов нераспределенного фонда представлена попутным ураном в комплексных рудах Улуг-Танзекского редкометалльного месторождения. Его освоение сдерживается в основном отсутствием промышленной технологии обогащения руд и сложностью дальнейшей переработки получаемых концентратов. Не передана также в освоение часть объектов Эльконского и Хиагдинского районов.

Несколько средних и мелких по масштабу месторождений Забайкальского и Хабаровского краев, Иркутской области, республик Карелия и Калмыкия в настоящее время не представляют практического интереса. Перспективы прироста запасов урана за счет реализации прогнозных ресурсов наиболее достоверных категорий P_1 и P_2 имеются – в пересчете на $C_{2усл}$. они составляют 211 тыс. т.

Таким образом, российская сырьевая база урана значительна и позволяет стране ежегодно входить в десятку крупнейших мировых продуцентов. Вся урановая промышленность – от добычи до производства ядерной продукции – находится под контролем государственной корпорации «Росатом».

В рамках развития сырьевой базы наиболее активно реализуются проекты освоения месторождений Хиагдинского района под отработку методом СПВ [3]. К 2023 г. при условии выполнения проектных решений в обозначенные сроки добыча урана в стране увеличится на 1 тыс. т. Кроме того, с 2026 г. ожидается рост добычи в Стрельцовском рудном поле за счет освоения месторождений Аргунское и Жерловое.

Безопасному и рациональному освоению ресурсов Стрельцовского рудного поля может и должен способствовать Геодинамический полигон, созданный и развиваемый консорциумом академических институтов: ИГЕМ РАН, ИГД ДВО РАН, ИЗК СО РАН, ИФЗ РАН [8].

Освоение крупных месторождений Эльконского рудного района возможно только при существенном снижении себестоимости получения урана путем усовершенствования технологии добычи и переработки руд и при повышении цен на сырье [2, 10].

В период 2020–2030 гг. сложная ситуация на рынке урана скорее всего ограничит возможности вовлечения в эксплуатацию новых объектов. В этот период наиболее активно будут отрабатываться запасы методом СПВ с низкой себестоимостью добычи. В связи с этим будут активизированы работы, проводимые Роснедра в Витимском урановорудном районе. Интенсификация работ по изучению и выявлению подобных объектов позволит восполнить активно погашаемую в этот период рентабельную часть МСБ и обеспечит задел для стабильного и устойчивого развития в России самого экологичного и безопасного метода добычи урана.

К 2030–2035 гг. в России возможно формирование дефицита уранового сырья из-за истощения запасов осваиваемых урановых месторождений. В связи с этим необходимо уже в настоящее время расширить работы по поиску месторождений высокотехнологичных руд в песчаниках, месторождений с богатыми рудами в вулканотектонических структурах и в зонах древних структурно-стратиграфических «несогласий».

Первоочередными для развития ГРР должны стать районы Сибири и Дальнего Востока.

В долгосрочной перспективе по мере истощения запасов с низкой себестоимостью добычи начнут вовлекаться в отработку новые месторождения с «дорогими» горными способами добычи. Для появления и подготовки таких объектов в период 2020–2035 гг. ГК «Росатом» запланированы поисковые, оценочные и разведочные работы в Стрельцовском рудном поле для улучшения качества МСБ уранодобывающего предприятия ПАО «ППГХО».

В целом региональные прогнозно-минерагенические, поисковые и оценочные работы на уран, планируемые на период 2020–2050 гг., характеризуются все более усложняющимися географическими (удаленность, отсутствие инфраструктуры, климат), горнотехническими (глубина залегания, многолетнемерзлые породы и прочее) и иными условиями, необходимостью перехода к инновационным технологиям поиска слабопроявленного и скрытого оруденения, что требует существенного увеличения объема инвестиций.

* * *

Выдающиеся успехи советских геологов, в исторически сжатые сроки обеспечивших нашу страну крупнейшей в мире МСБ урана, могут быть объяснены только одним обстоятельством – беспрецедентной концентрацией интеллектуальных человеческих, материально-технических и финансовых ресурсов на решение жизненно важной государственной задачи.

Нельзя также обойти стороной высочайший организационный уровень этой трудовой эпопеи. Было системно продумано и реализовано все – обучение специалистов в ВУЗах и техникумах, их льготное трудоустройство, широкое жилищное и социально-культурное строительство в местах базирования геологоразведочных организаций, производство геологоразведочной техники, материально-техническое снабжение, комплексные мероприятия по обеспечению высокого престижа профессии разведчика недр.

Все это стало возможным в рамках уникального народно-хозяйственного организма, включающего различные организации, находившиеся в ведомстве Министерства геологии и охраны недр СССР, Академии наук СССР, Министерства среднего машиностроения СССР, Министерства высшего и среднего специального образования СССР, обеспечившие сырьевую независимость державы на длительную перспективу.

Литература

1. Атомный проект СССР: Документы и материалы: В 3 т. / Под общ. ред. Л.Д. Рябева. М-во РФ по атом. энергии; Отв. сост. Г.А. Гончаров. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2003. – 640 с.
2. Государственный доклад «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2019 году» / «ВИМС», «ВНИГНИ», «Гидроспецгеология»; гл. ред. Е.А. Киселев. – М., 2020. – 422 с.
3. Живов В.А., Бойцов А.В., Шумилин М.В. Уран: геология, добыча, экономика. – М.: РИС «ВИМС», 2012. – 304 с.
4. Лаверов Н.П., Смилкстын А.О., Шумилин М.В. Зарубежные месторождения урана. – М.: Недра, 1983. – 320 с.
5. Месторождения стратегических и высокотехнологичных металлов Российской Федерации: закономерности размещения, условия формирования, инновационные технологии прогноза и освоения (научные результаты, программы Президиума РАН № I.48) / Гл. ред. Н.С. Бортников; Отв. сост. В.А. Петров. – М.: ИГЕМ РАН, 2020. – 317 с.
6. Подземное выщелачивание полиэлементных руд / Н.П. Лаверов, И.Г. Абдульманов, К.Г. Бровин и др.; под. ред. Н.П. Лаверова. – М.: Изд-во Акад. горн. наук, 1998. – 445 с.
7. Пятов Е.А. Стране был нужен уран: история геологоразведочных работ на уран в СССР. – М.: РИС «ВИМС», 2005. – 246 с.
8. Рассказов И.Ю., Петров В.А., Гладырь А.В., Тюрин Д.В. Геодинамический полигон Стрельцовского рудного поля: практика и перспективы // Горный журнал. 2018. № 7(2252). С. 15–19.
9. Создание и развитие минерально-сырьевой базы отечественной атомной отрасли / Под общ. ред. Н.П. Петрухина. Авторы-составители: Ю.В. Нестеров, Н.П. Петрухин. – М.: АО «Атомредметзолото», 2017. – 399 с.
10. Уран Российских недр / Г.А. Машковцев, А.К. Константинов, А.К. Мигута, М.В. Шумилин, В.Н. Щеточкин. – М.: ВИМС, 2010. – 850 с.
11. Урановой геологии ВИМСа – 70 лет / Гл. ред. Г.А. Машковцев. – М.: РИС «ВИМС», 2013. 160 с.
12. Экзогенные эпигенетические месторождения урана. Условия образования / С.Г. Батулин, Е.А. Головин, О.И. Зеленова и др.; под. ред. А.И. Перельмана. – М.: Атомиздат, 1965. – 324 с.
13. Atomic project of the USSR: Documents and materials: In 3 v. / Gen. ed. L.D. Ryabev. M-vo RF on atom. energy; Ed. comp. G.A. Goncharov. – Sarov: RFNC-VNIIEF, 2003. – 640 p.
14. State report «On the state and use of mineral resources of the Russian Federation in 2019» / «VIMS», «VNIGNI», «Hydrospetsgeologiya»; Gen. ed. E.A. Kiselev. – М.: 2020. – 422 p.

15. Zhivov V.A., Boitsov A.V., Shumilin M.V. Uranium: Geology, mining, economy. – M.: RIS «VIMS», 2012. – 304 p.
16. Laverov N.P., Smilkstin A.O., Shumilin M.V. Foreign deposits of uranium. – Moscow: Nedra, 1983. – 320 p.
17. Deposits of strategic and high-tech metals of the Russian Federation: regularities of placement, conditions of formation, innovative technologies for forecasting and development (scientific results, programs of the Presidium of the Russian Academy of Sciences No. I. 48) / Gen. edit. N.S. Bortnikov: Res. comp. V.A. Petrov. – M.: IGEM RAS, 2020. – 317 p.
18. Underground leaching of polyelement ores / N.P. Laverov, I.G. Abdulmanov, K.G. Brovin, etc.; ed. by N.P. Laverov, Moscow: Akad. Gorn. nauk, 1998. – 445 p.
19. Pyatov E.A. The country needed uranium: the history of geological exploration for uranium in the USSR. – M.: RIS «VIMS», 2005. – 246 p.
20. Rasskazov I.Yu., Petrov V.A., Gladyr A.V., Tyurin D.V. Geodynamic polygon of the Streltsovsk ore field: practice and prospects // 2018. No. 7(2252). P. 15–19.
21. Creation and development of the mineral resource base of the domestic nuclear industry / Gen. edit. N.P. Petrukhin. Comp.: Yu.V. Nesterov, N.P. Petrukhin. – M.: JSC Atomredmetzoloto, 2017. – 399 p.
22. Uranium of the Russian subsoil / G.A. Mashkovtsev, A.K. Konstantinov, A.K. Miguta, M.V. Shumilin, V.N. Shchetochkin. – Moscow: VIMS, 2010. – 850 p.
23. VIMS uranium Geology – 70 years / Edit. G.A. Mashkovtsev. – Moscow: RIS «VIMS», 2013. – 160 p.
24. Exogenous epigenetic deposits of uranium. Conditions of education / S.G. Batulin, E.A. Golovin, O.I. Zelenova, etc.; edit. A.I. Perelman. – M.: Atomizdat, 1965. – 324 p.

А.Д. Каприн¹, В.П. Смирнов²

ЯДЕРНАЯ МЕДИЦИНА

История радиологии в России началась с открытий трех выдающихся ученых: Антуана Анри Беккереля, открывшего в 1896 году явление радиоактивности урановой руды, а также Пьера и Марии Кюри, выделивших из развалов урановой руды новые элементы – полоний и радий [1]. С этих пор многие открытия в области ядерных технологий стали толчком к разработке и развитию новых методов лечения: как говорил великий Игорь Васильевич Курчатов, «атом должен быть рабочим, а не солдатом» [2].

В 1903 году, в одной из своих зарубежных поездок, Владимир Матвеевич Зыков, выдающийся хирург-онколог, доктор медицины, познакомился с Марией Кюри, которая, в свою очередь, передала В.М. Зыкову на нужды развития науки в России бесценный подарок – несколько мг изотопа радия-226. Это были первые источники ионизирующего излучения в России [3].

Фотографии основоположников ядерной медицины в России показаны на рис.1.

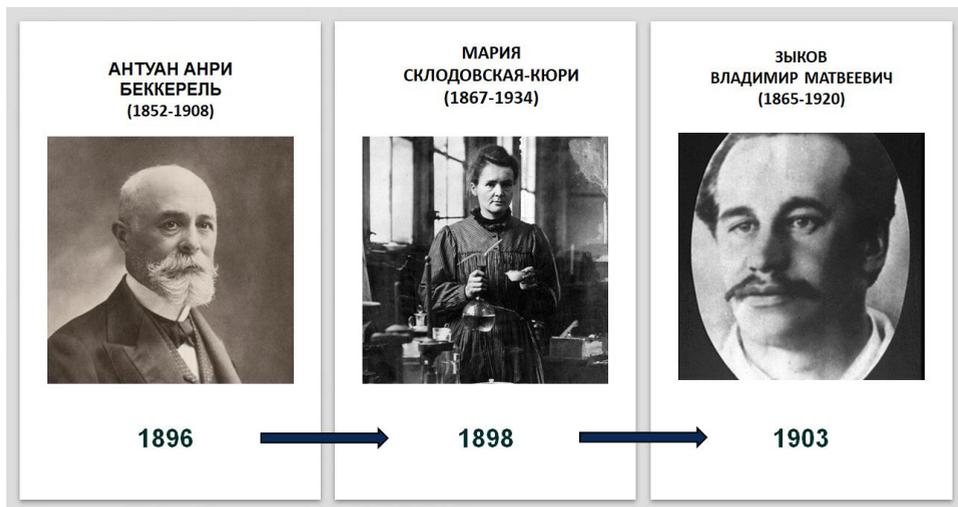


Рис. 1. Основоположники ядерной медицины в России

¹ Главный внештатный специалист онколог Минздрава России (ЦФО, ПФО и СКФО), генеральный директор ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России, академик РАН.

² Научный руководитель АО «НИИТФА», академик РАН.

На сегодняшний день клиническая брахитерапия разделилась на три направления: высокодозная / высокомощностная (капсулы с кобальтом-60, цезием-137 и иридием-192), низкодозная /низкомощностная (капсулы с йодом-125, палладием-103 или цезием-131) и электронная брахитерапия.

В России активное внедрение брахитерапии началось с 2000 г. микроисточниками зарубежного производства. В качестве источника ионизирующего излучения для высокодозной брахитерапии использовались зарубежные капсулы с радиоизотопом иридий-192, а в качестве источника излучения для низкодозной брахитерапии – капсулы с йодом-125.

ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России принимал активное участие в создании и регистрации отечественных микроисточников на базе АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» (г. Обнинск), и с 2016 года в России появились отечественные микроисточники с йодом-125 для низкодозной брахитерапии, которые на сегодняшний день применяются во многих отделениях брахитерапии в России (см. рис. 2).

Электронная брахитерапия, представляющая собой миниатюрный рентгеновский источник излучения, работающий при низких энергиях «от сети», активно завоевывает свою терапевтическую нишу за рубежом, в России пока не используется [5].

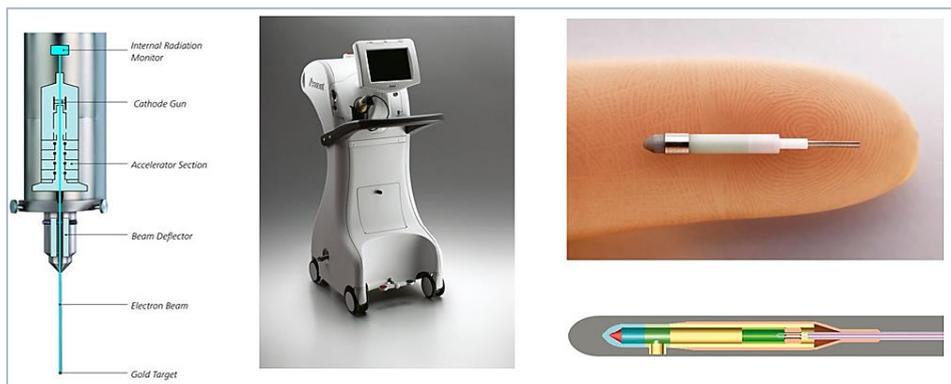


Рис. 2. Устройство для электронной брахитерапии

С 1922 года внук известного революционера-демократа Александра Ивановича Герцена и сын крупнейшего физиолога Европы Александра Александровича Герцена, Павел Александрович Герцен кардинально изменил характер онкологической деятельности в нашей стране. Он стал идеологом

комбинированного метода лечения, учения о метастазировании, заложил основы современной организации онкологической службы и разработал конкретные методы лечения злокачественных опухолей основных локализаций, в том числе с использованием ионизирующего излучения [3].

В это же самое время в мире стала бурно развиваться коммерческая деятельность по использованию радиоизотопов радия (радий-226 и радий-228) в разных сферах деятельности – от косметической (светящиеся румяна, тени и пудра), до медицинской – в США и Европе был разрешен к медицинскому применению радиевый тоник, который, по мнению врачей, ослаблял боли при переломах [6].

В 1923 году в СССР раствор хлорида радия-224 был официально разрешен в качестве радиофармпрепарата для облегчения болей в костях.

На протяжении многих следующих десятилетий лечебные радиофармпрепараты (РФЛП) с радиоактивными изотопами фосфора-32, стронция-89, рения-186 и самария-153 успешно использовались в паллиативном лечении костных метастазов для облегчения болевого синдрома и улучшения качества жизни пациентов. Все РФЛП с этими изотопами имели как свои преимущества, так и недостатки. Последние выражались в основном в переоблучении красного костного мозга и связанными с этим фактом побочными эффектами, проявляющимися в виде анемии, нейтропении и миелосупрессии.

И, наконец, в 2018 году в США, Европе, а затем и в России был зарегистрирован новый радиофармпрепарат, который предполагал уже не только возможности паллиативного лечения, но и повышал уровень общей выживаемости пациентов. В основу этого препарата вошел радиоизотоп радий-223[7].

Однако радий-224 в наше время не забыт. На сегодняшний день в Израиле разработаны и успешно прошли мультицентровые клинические испытания по брахитерапии ряда злокачественных солидных новообразований, в том числе и в ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России, альфа-излучающие микроисточники с радием-224.

Таким образом, радий вернулся в ядерную медицину, но уже в качестве радиофармпрепарата, обладающего наиболее лучшим терапевтическим эффектом.

Помимо радионуклидной терапии костных метастазов (см. рис.3) и брахитерапии (см. рис.4.) в мире активно развивается направление по радионуклидному лечению воспалительных заболеваний суставов, основанный на внутрисуставном введении РФЛП, меченого β -излучающими радионуклидами для разрушения гипертрофированной синовиальной оболочки (Радиосиновектомия / PCO).

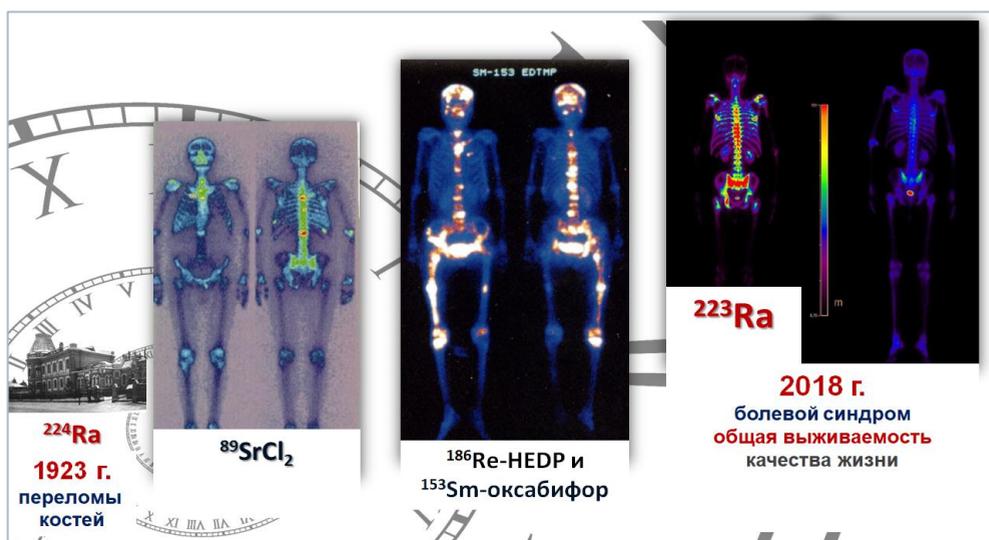


Рис. 3. «Вехи» в развитии радионуклидной терапии костных метастазов: сцинтиграфия скелета после введения РФЛП с различными радиоизотопами



Рис. 4. Альфа-брахитерапия плоскоклеточной карциномы

В клиническом руководстве EANM процедура РСО показана при ряде воспалительных заболеваний, таких как:

- ревматоидный артрит и артриты иной природы;
- Болезнь Бехчета и рецидивирующие внутрисуставные выпоты;
- гемартроз при гемофилии; остеоартроз и другие заболевания суставов.

За рубежом применяют целую линейку РФЛП для РСО (таблица 1) [8].

Таблица 1

Характеристики разрешенных к применению в Европе РФЛП для РСО

Радионуклид (частица)	Объем (мл)	Размер частиц (мкм)	Период полураспада (дни)	Макс. энергия β -излучения (МэВ)	Глубина проникновения β -излучения в мягкой ткани (мм)	Гамма – излучение (КэВ)	Суставы
Иттрий-90 (цитрат)	<2	3-6	2,7	2,2	3,8-11/<8,5	---	Колено
Рений (коллоид/сульфит)	<1	5-10	3,7	1,07	1,2-3,7/<3,1	140	Плечо
Эрбий (цитрат)	<0,2	3-8	9,4	0,34	0,3-1,0/<0,7	---	Все
Золото		2,7	0,96		1,2-3,6	411	Колено
Фосфор (метахром)		10-20	14	1,7	2,6-7,9	---	Колено
¹⁶⁶ Ho макро-агрегаты		5-10	1,2	1,8	2,2-8,7	81	Колено
¹⁶⁵ Dy макро-агрегаты		3-10	0,09	1,3	1,4-5,6	95	Колено

На сегодняшний день в России нет зарегистрированных РФЛП для РСО. Однако недавно разработаны и успешно прошли доклинические исследования два отечественных РФЛП с радиоизотопом рений-188 для процедуры РСО: «Синорен, 188Re» – разработка ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, и «Микросферы альбумина 5–10 мкм, 188Re» – разработка ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России [9, 10].

Радионуклидная эмболизация (РЭ) применяется для терапии неоперабельного первичного и метастатического рака печени, когда через внутрипеченочную артерию в сосуды, кровоснабжающие опухолевый очаг, подводят радиоактивное вещество, одновременно перекрывая кровоснабжение опухолевых клеток в этой области. Синергия воздействия

ионизирующего излучения наряду с кислородным голоданием эффективно убивает опухолевые клетки и позволяет неоперабельную опухоль сделать операбельной, или дает время пациенту на дожитие до трансплантации печени.

В настоящее время в мире доступны три коммерческих препарата для РЭ: стеклянные и полимерные микросферы с радионуклидом иттрий-90 и полимерные микросферы с радионуклидом гольмий-166.

В России зарегистрирован один отечественный препарат для РЭ – стеклянные микросферы с иттрием-90, производства ООО «Бебиг». В ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России РЭ микросферами ООО «Бебиг» на сегодняшний день успешно провели РЭ уже 8 пациентам.

Однако у этого производства имеется один, но весьма значительный недостаток. Для активации микросфер необходимо высокопоточное нейтронное излучение ядерного реактора. Этот факт определяет логистическую схему поставки препарата и его стоимость.

Для устранения этого недостатка в ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России были разработаны и успешно прошли доклинические исследования микросферы альбумина крови человека, диаметром 20–40 мкм, меченные радионуклидом рений-188.

Среди достоинств радиофармпрепаратов на основе микросфер альбумина крови человека, меченных рением-188, можно выделить то, что:

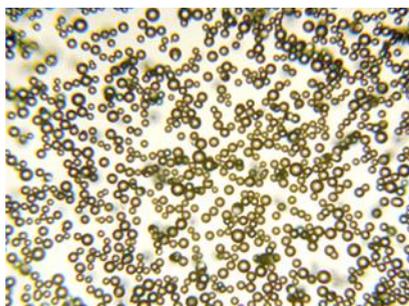
- микросферы имеют четкую сферическую форму и узкий размерный ряд: > 95% микросфер находятся в диапазоне размеров 5–10 мкм;
- микросферы альбумина биоразлагаемы и биосовместимы: они подвергаются протеолизу после внутрисуставной инъекции;
- генераторный радионуклид ^{188}Re удобен в использовании, кроме того: высокая локальная терапевтическая доза РФЛП обусловлена высокой энергией β -излучения ^{188}Re ;

сопутствующее гамма-излучение ^{188}Re (155 кэВ) позволяет контролировать биораспределение РФЛП с помощью гамма-камеры;

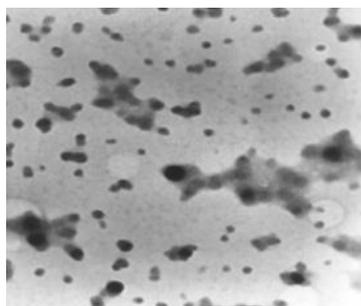
радионуклид получают из генератора $^{188}\text{W}/^{188}\text{Re}$, установленного в клинике, и РФЛП готовят на месте, непосредственно перед инъекцией пациенту.

Начало ядерных испытаний дало пласт знаний, в том числе и о радиоизотопах йода, которые выделяются из продуктов деления ядер урана, плутония, тория и являются одним из основных загрязнителей природной

среды [11]. Радиоизотопы йода в первую очередь представляют большую радиационную опасность для человека и животных в связи со способностью накапливаться в щитовидной железе, замещая природный йод.



Микросферы альбумина 5-10 μm



Коллоид сульфида рения

Рис. 5. Сравнение размеров и однородности распределения микрочастиц коллоида и микросфер альбумина крови человека

В 1950 г. Советский Союз одним из первых в мире взял курс на мирный атом. Основной и первой большой победой на этом пути стал пуск первой в мире атомной электростанции мощностью 5 МВт в Обнинске 26 июня 1954 года [11]. А уже из отработанного ядерного топлива атомной станции началось выделение йода-131 для медицинского применения в России при заболеваниях щитовидной железы (ЩЖ).

Радиойодтерапия основана на способности щитовидной железы селективно накапливать йод. При многих заболеваниях ЩЖ накопление йода многократно увеличивается. Кроме того, способностью селективно накапливать йод обладают и метастазы ЩЖ. Это вошло в основу радиойодлечения (радиойодабляция) метастазов ЩЖ.

Основанное в начале 1980-х годов отделение радионуклидной терапии (РНТ) в МРНЦ им. А.Ф. Цыба – филиале ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России (г. Обнинск) – первый и крупнейший в России объект терапевтического применения радионуклидов. Здесь получают РНТ более 40 % всех пациентов страны, и потребляется более половины отечественных терапевтических РФЛП, проводят 30 % от всей радиойодтерапии в стране.

В России за последние 10 лет также наметился прогресс в развитии РНТ. Если в 2009 г. в стране было всего 2 клиники, где проводили РНТ, и 50 активных коек для радиойодтерапии, то к 2020 году количество активных

коек увеличилось до 125, а число центров возросло до 9. Центры РНТ равномерно расположены по всей населенной территории России.

С изобретением приборов визуализации распределения радиоактивности в организме пациентов активно стала развиваться в России и мире радионуклидная диагностика. Ведь ранняя диагностика заболевания является залогом успешного лечения.

Первый прототип ПЭТ-сканера появился в 1952 году в Массачусетском госпитале, однако проводимые на нем исследования еще нельзя было назвать томографическими, так как в итоге врачи получали только одно двумерное изображение, а не их последовательность. В 1958 году американский биофизик и инженер Холл Ангер изобрел гамма-камеру. В клиническую практику ПЭТ-сканеры и гамма-камеры вошли уже в конце 70-х годов [12].

В России одним из ведущих центров в данном направлении является НИЦ «Курчатовский институт», где расположены установки, позволяющие производить широкий спектр радионуклидов, на основе которых синтезируются диагностические РФЛП: это реакторные радионуклиды, циклотронные, а также радионуклиды, которые получают методом лазерной селекции. В НИЦ «Курчатовский институт» накоплен максимальный в стране опыт исследований и разработок в области позитронно-эмиссионной томографии, а также проводятся НИР с использованием таких методов лучевой диагностики, как магнитно-резонансная томография и рентгеновская компьютерная томография.

Рис. 6 иллюстрирует, как атом встал «на службу» человеку: от покорения просторов Земли до лучевой терапии злокачественных новообразований.

3 декабря 1959 года стал днём рождения единственного в мире атомного ледокольного флота. Первое в мире надводное судно, оснащённое ядерной силовой установкой, ледокол «Ленин» стало свидетельством индустриального и технологического прорыва СССР [11]. 20 января 1960 г. было подписано Постановление Совета Министров СССР № 60-20 о принятии на вооружение межконтинентальной баллистической ракеты Р-7 разработки КБ С.П. Королёва для доставки ядерных боеприпасов. Так в Советском Союзе был создан новый вид вооружённых сил – Ракетные войска стратегического назначения. А 9 сентября 1960 г. произошло важное событие в масштабах мировой физики – циклотрон У-300 дал первый пучок ускоренных ядер азота до 10 МэВ/н [11].

На протяжении 17 последующих лет циклотрон У-300 оставался самым мощным и самым лучшим среди действующих ускорителей тяжёлых ионов в мире как по интенсивности пучков, так и по разнообразию ускоряемых ионов.



Рис. 6. Атом «на службе» человеку: от покорения просторов Земли до лучевой терапии злокачественных новообразований

Развитие протонной лучевой терапии в нашей стране началось практически одновременно с ведущими странами мира. Первый в СССР протонный пучок с параметрами, необходимыми для лучевой терапии, был получен в 1967 г. в лаборатории ядерных проблем ОИЯИ (Дубна) по предложению В.П. Джелепова на 680 МэВ-ном фазотроне (рис. 7, а) [11].

В 2016 году свою работу начал первый протонный синхротрон «Прометеус» (рис. 7, б) для внутриклинического размещения, созданный в ФТЦ ФИАН под руководством члена-корреспондента РАН В.Е. Балакина [13]. В настоящее время терапевтический комплекс располагается в Обнинске на базе ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России, где специалисты Центра специализируются на лечении опухолей головы и шеи.

За период работы установки в г. Обнинске прошли эффективное лечение более 300 человек, у которых наблюдается положительная посттерапевтическая динамика онкологического заболевания.



a)

б)



Рис. 7. Фазотрон в Объединенном институте ядерных исследований (г. Дубна) (а); протонная установка «Прометеус» в МРНЦ им. А.Ф. Цыба (г. Обнинск) (б)

Крайне интересной и перспективной для мирового научного сообщества является терапия радиорезистентных (в том числе – и к протонной терапии) опухолей тяжелыми ионами углерода. По наиболее консервативным оценкам, не менее 10% больных, нуждающихся в лучевом лечении, получают существенный выигрыш от использования ионной терапии, что составляет для России 26000 человек.

Число комплексов терапии тяжелыми ионами углерода в мире достигло 13. Комплексы продолжают создаваться в Китае и Южной Корее. Исторически с 1992 г. наибольшим опытом создания подобных комплексов для клинического использования обладают японские инженеры [14]. В настоящий момент Россия не располагает клиническими центрами ионной терапии. Тем не менее российскими специалистами ведется активная работа в данном направлении.

ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России поддерживает научные контакты с крупнейшими центрами ионной терапии Японии и Германии. Коллектив Центра непосредственно участвовал в физических исследованиях и математическом моделировании пучка ионов углерода ^{12}C . Проведя серию биологических исследований пучка ионов углерода ^{12}C на клеточных культурах опухолей и лабораторных животных, коллектив ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России получил уникальный и единственный на территории нашей страны опыт доклинического применения пучка ионов углерода ^{12}C .

Также ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России совместно с НИИТФА ведет работу по созданию отечественного комплекса лучевой терапии (КЛТ-6) на основе ускорителя электронов с энергией 6 МэВ, а совместно с ФГУП ВНИИА им. Н.Л. Духова и НИИТФА ведется создание медицинской установки для нейтронной терапии на базе малогабаритного нейтронного генератора НГ-24.

Технологический, научный и производственный потенциал ВНИИА и НИИТФА обеспечивает с минимальными затратами серийное производство компактных и недорогих установок для нейтронной терапии, что позволяет кардинально расширить применение высокотехнологичной медицины в лечении онкологических больных в России (см. рис. 8).

В 2021 году начаты клинические испытания таких установок.

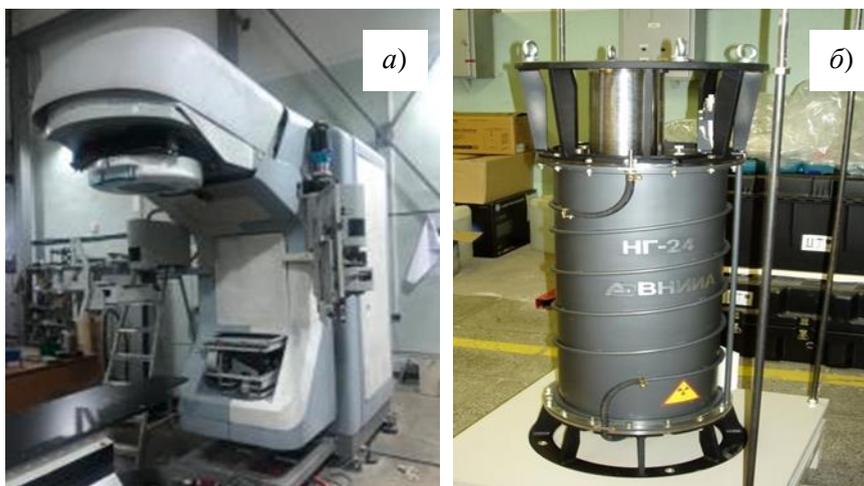


Рис. 8. Комплекс лучевой терапии Ониск (КЛТ-6) на основе 6 МэВ ускорителя (а); малогабаритный нейтронный генератор НГ-24 (б)

В конце XX – начале XXI века, когда современная медицина уже не могла обходиться без ядерной медицины, во главу угла встала не физика, а радиофармацевтика. Возникло новое направление в ядерной медицине – «тераностика», объединяющее слова «ТЕРАпия» и «диагНОСТИКА».

Основными задачами тераностики являются:

- молекулярная визуализация и точная молекулярно-метаболическая оценка состояния биологических процессов, в т.ч. на ранних стадиях, когда это недоступно другим видам исследования;
- высокоинтенсивное прицельное адресное лучевое воздействие на молекулярно-клеточном уровне непосредственно на клетки и органы-мишени без повреждения здоровых тканей;
- одновременное воздействие на все патологические очаги с возможностью их одновременной визуализации;
- посттерапевтический мониторинг состояния организма и патологических очагов.

В мире основные работы стали проводиться не по поиску новых радионуклидов, а по синтезу новых транспортных молекул, которые, в зависимости от свойств конъюгированных с ними радионуклидов, будут создавать либо диагностические РФЛП, либо РФЛП для терапии.

Так, в ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России были разработаны и прошли первую фазу клинических испытаний два отечественных РФЛП с

рением-188 на основе фосфоновой и золедроновой кислоты для радионуклидной терапии костных метастазов. Эти РФЛП показали превосходное накопление в патологических костных структурах с минимальной лучевой нагрузкой на организм в целом. Проводятся работы по скорейшей регистрации этих РФЛП для клинического применения в России.

В 2018 году в Европе и США был разрешен для клинического применения инновационный зарубежный РФЛП «Лютатерра, ^{177}Lu » для пептид-рецепторной радионуклидной терапии нейроэндокринных злокачественных новообразований (НЭО). Этот РФЛП показал высокую терапевтическую эффективность: за период наблюдения в группе пациентов с НЭО, принимающих РФЛП «Лютатерра, ^{177}Lu », общая выживаемость за период наблюдения, равный 30 месяцам после терапии, была выше на 45% в сравнении с контрольной группой (см. рис.9).

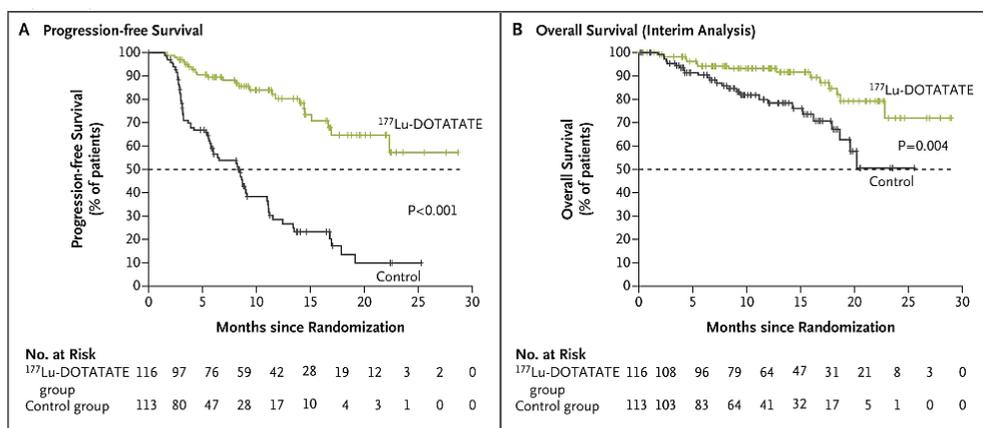


Рис. 9. График выживаемости без прогрессирования заболевания и общая выживаемость пациентов после терапии РФЛП «Лютатерра»

В России этот препарат еще не появился, однако в ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России совместно с партнерами проводятся работы по синтезу отечественного аналога этого РФЛП.

Также специалистами МРНЦ им. А.Ф. Цыба – филиала ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России была разработана технология получения инновационного отечественного диагностического РФЛП на основе моноклональных антител, специфичных к ПСМА и меченных генераторным радионуклидом технеций-99м для ОФЭКТ диагностики метастатического

кастрат-резистентного рака предстательной железы (мКРРПЖ) и меченного лютецием-177 для радиолигандной терапии этого же заболевания. ПСМА представляет собой простат-специфичный мембранный антиген, обладающий высокой экспрессией на поверхности клеток рака предстательной железы. Единственный шанс на успешное лечение мКРРПЖи – его ранняя диагностика. В мире применяются несколько РФЛП для диагностики мКРРПЖ: для ПЭТ – 68Ga-ПСМА-11, 18F-ПСМА1007, для ОФЭКТ – 99mTc-ПСМА-I&S, 99mTc-MIP-1404, и два РФЛП для радиолигандной терапии мКРРПЖ: 177Lu-ПСМА-617 и 225Ac-ПСМА-617.

Препараты пока нигде в мире не зарегистрированы, однако уже более 10 лет активно и эффективно применяются за рубежом (страны Евросоюза, США, Канада, Китай, Япония, Австралия и др.).

В настоящее время специалистами МРНЦ им. А.Ф. Цыба – филиала ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России проводятся работы по созданию инновационных РФЛП на базе фрагментов моноклональных антител (мАт), специфичных к GD2 ганглиозиду, меченных радионуклидами галлия-68, технеция-99m, актиния-225 и рения-188 для диагностики и лечения ЗНО. Партнерами работ являются: компания ООО «Реал-Таргет» – разработчик анти GD2 моноклональных антител и их фрагментов, и АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» – единственный отечественный производитель сорбционных генераторов рения-188 и раствора актиния-225 медицинского качества.

Инициатива ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России о возможности изготавливать в клиниках РФЛП, которые успешно применяются за рубежом, но не зарегистрированы в России, была поддержана Минздравом России.

В 2019–2020 гг. была проведена и проводится до сих пор большая работа по изменению нормативного законодательства в этой сфере. Приказом Министерства здравоохранения Российской Федерации от 31 июля 2020 г. № 780н «Об утверждении видов аптечных организаций» (вступил в силу с 1 января 2021 г.) введен новый вид аптеки как структурного подразделения медицинской организации – производственная аптека с правом изготовления радиофармацевтических лекарственных препаратов. Готовится к выпуску еще один приказ Минздрава России о порядке изготовления РФЛП в медицинских организациях, где более подробно прописаны правила изготовления РФЛП, который заменит действующий приказ № 211н от 27 апреля 2015 г.

Основными отличиями устанавливаемого новым приказом порядка являются: уточнение требований, предъявляемых к помещениям, оборудованию, системе документации, персоналу, контролю качества при изготовлении радиофармацевтических лекарственных препаратов, системе обеспечения качества в медицинской организации с учетом норм радиационной безопасности, требований санитарно-эпидемиологических правил и гигиенических нормативов, установленных законодательством Российской Федерации.

Подводя итоги, можно отметить, что основными тенденциями в мировой ядерной медицине будущего будут:

- 1) четкое разделение между компаниями, специализирующимися на диагностике, и компаниями, развивающими направление терапии;
- 2) диагностика останется в сфере компетенций радиофармацевтических компаний, тогда как традиционные фармацевтические компании будут сосредоточены на терапевтических РФЛП;
- 3) тераностика станет приоритетным направлением развития в радиофармацевтике.

Поэтому первоочередными задачами отечественной ядерной медицины должны стать:

- создание собственных образцов тяжелой техники для лучевой диагностики и терапии;
- организация полного цикла производства в стране – от разработки сырья до вывода на рынок новых РФЛП;
- развитие кадрового потенциала по конструированию, производству, испытанию, введению в серию РФЛП и аппаратуры для ядерной медицины;
- усовершенствование законодательной базы по производству и оказанию медицинских услуг в этой области;
- **финансирование, контроль и выполнение НИОКР по развитию ядерной медицины междисциплинарными коллективами.**

Литература

1. Trombetta M. Madame Maria Sklodowska-Curie - brilliant scientist, humanitarian, humble hero: Poland's gift to the World. J Contemp Brachytherapy. 2014 Oct;6(3):297-9. doi: 10.5114/jcb.2014.45133. Epub 2014 Sep 10. PMID: 25337133; PMCID: PMC4200180.

2. Орлова Г. Расшифровка Что такое мирный атом [Электронный ресурс] // arzamas. academy, 2020. URL: <https://arzamas.academy/materials/2199>.

3. Каприн А.Д., Чиссов В.И., Дрошнева И.В. Страницы истории МНИОИ имени П.А. Герцена [Электронный ресурс] // МНИОИ им. П.А. Герцена - филиал ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России, 2020. URL: <https://www.mnioi.nmicr.ru/about/history.php> (дата обращения: 17.12.2020).

4. Rivard MJ, Venselaar JL, Beaulieu L. The evolution of brachytherapy treatment planning. *Med Phys.* 2009 Jun; 36(6):2136-53. doi: 10.1118/1.3125136. PMID: 19610303.

5. D. Eaton. Electronic brachytherapy – current status and future directions // *British Journal of Radiology* – March 2015.

6. Medicine: Radium Drinks // *TIME USA*. 1932. 11 апр. URL: <http://content.time.com/time/subscriber/article/0,33009,743525,00.html> (дата обращения: 17.12.2020).

7. Hoskin P, Sartor O, O'Sullivan JM, Johannessen DC, Helle SI, Logue J, Bottomley D, Nilsson S, Vogelzang NJ, Fang F, Wahba M, Aksnes AK, Parker C. Efficacy and safety of radium-223 dichloride in patients with castration-resistant prostate cancer and symptomatic bone metastases, with or without previous docetaxel use: a prespecified subgroup analysis from the randomised, double-blind, phase 3 ALSYMPCA trial. *Lancet Oncol.* 2014 Nov;15(12):1397-406. doi: 10.1016/S1470-2045(14)70474-7. Epub 2014 Oct 17. PMID: 25439694.

8. Dash A., Farahati J., Giammarile F., Jalilian A. Production, Quality Control and Clinical Applications of Radiosynovectomy agents // *IAEA Technical Reports Series* – August 2019.

9. Кодина Г.Е., Малышева А.О., Клементьева О.Е., Таратоненкова Н.А., Лямцева Е.А., Жукова М.В., Красноперова А.С. Синорен ¹⁸⁸Re – потенциальный радиофармацевтический лекарственный препарат для радиосиноэктомии // *Радиация и риск*. 2018. Том 27. №4.

10. Радиофармацевтическая композиция для терапии воспалительных заболеваний суставов на основе радионуклида ¹⁸⁸Re и микросфер альбумина крови человека, а также состав и способ ее получения: пат. 2698101; заявители: Дороватовский С.А., Петриев В.М., Зверев А.В., Скворцов В.Г., Каприн А.Д., Антонюк А.В., Лесковец Е.Ю.; заявл. 25.05.2018; регистр. 22.08.2019.

11. 75 лет Атомной промышленности. Опережая время // Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом», 2020. URL: <https://www.atom75.ru/#history> (дата обращения: 17.12.2020).

12. History of PET and MRI // U.S. Department of Energy. Molecular Nuclear Medicine Legacy, 2009 Sept. URL: <https://medicallsciences.energy.gov/historypetmri.shtml> (дата обращения: 17.12.2020).

13. Первый опыт клинического использования терапевтического протонного комплекса «Прометеус»: тез. докл. 2-го Всероссийского съезда по радиохирургии и стереотаксической радиотерапии. СПб., 2016. С. 102.

14. Malouff TD, Mahajan A, Krishnan S, Beltran C, Seneviratne DS, Trifiletti DM. Carbon Ion Therapy: A Modern Review of an Emerging Technology. *Front Oncol.* 2020;10:82. Published 2020 Feb 4. doi:10.3389/fonc.2020.00082.

Л.А. Ильин¹, А.С. Самойлов²

РОЛЬ РАДИОБИОЛОГИИ И РАДИАЦИОННОЙ МЕДИЦИНЫ В ОБЕСПЕЧЕНИИ ЗАЩИТЫ ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ (ОТЕЧЕСТВЕННЫЙ ОПЫТ)

Началом систематизированных исследований в нашей стране в области радиобиологии, радиотоксикологии, радиационной медицины и радиационной безопасности следует считать 29 июня 1946 года [1]. Именно тогда специальным Постановлением Совета Министров СССР была создана радиационная лаборатория в качестве самостоятельного научно-исследовательского учреждения в системе Академии медицинских наук. В дальнейшем она была переименована в Институт биофизики, который в настоящее время является Государственным научным центром имени А.И. Бурназяна Федерального медико-биологического агентства.

Уже в феврале 1947 года президентом Академии медицинских наук Николаем Николаевичем Аничковым и директором этой лаборатории, членом-корреспондентом Академии наук СССР Глебом Михайловичем Франком был представлен доклад о предлагаемых направлениях и планах работ радиационной лаборатории, который был заслушан на заседании научно-технического совета (НТС) Первого Главного Управления Совета Министров СССР, отвечавшего за разработку и создание атомного оружия.

В обсуждении доклада приняли активное участие председатель НТС, научный руководитель атомного проекта академик Игорь Васильевич Курчатов и крупнейшие учёные в этой области – академики Николай Николаевич Семёнов, Юлий Борисович Харитон, Исаак Константинович Кикоин и другие.

В интересах исторической объективности следует отметить, что в конце 1946 года в посёлке Сунгуль на Урале в недрах 9-го Управления НКВД была создана, к сожалению, мало кому известная и в настоящее время, совершенно секретная Лаборатория «Б», в которой работали расконвоированные учёные,

¹ Почетный президент ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им А.И. Бурназяна ФМБА России, академик РАН.

² Генеральный директор ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им А.И. Бурназяна ФМБА России, член-корреспондент РАН.

отобранные из лагерей ГУЛАГа, интернированные немецкие специалисты и вольнонаёмные научные сотрудники [2].

По имеющимся данным, к работам, начатым в радиационной лаборатории Института биофизики, начиная с 50-х годов прошлого столетия было привлечено более 30 институтов и лабораторий Академии наук, Министерства здравоохранения, Министерства обороны, Госкорпорации «Росатом», кафедр и лабораторий Минвуза СССР. Координацию их деятельности осуществляла Проблемная комиссия №1 союзного значения и секция №5 НТС Госкорпорации «Росатом» [3].

Таким образом, история формирования радиационной медицины и радиобиологии в нашей стране связана с разработкой ядерного оружия в СССР и становлением атомной индустрии. У истоков развития названных наук стояли выдающиеся ученые и организаторы здравоохранения: член-корреспондент Академии наук Глеб Михайлович Франк, академики Академии медицинских наук СССР Август Андреевич Летавет, Фёдор Григорьевич Кротков, Ефим Иванович Смирнов.

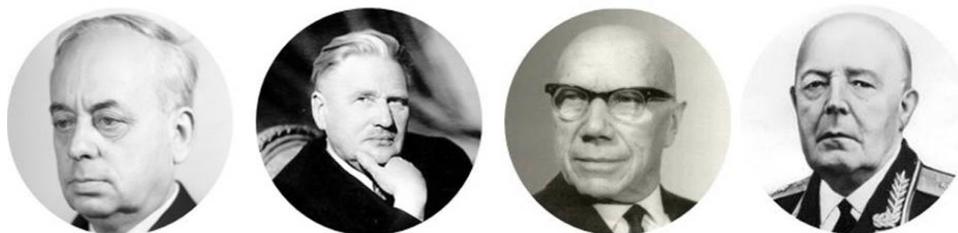


Рис. 1. Основоположники радиационной медицины и радиобиологии Г.М. Франк, А.А. Летавет, Ф.Г. Кротков, Е.И. Смирнов

Одним из ведущих направлений научных исследований в области радиационной медицины и радиоэпидемиологии является изучение отдалённых последствий облучения персонала и населения, включая оценку риска онкологических и генетических эффектов. Эта задача решается путем создания медико-дозиметрических регистров (МДР), социальная значимость которых определяется уникальным сочетанием накопленного исторического опыта отечественной радиационной медицины и современных высокоэффективных компьютерных технологий.

К основным медико-дозиметрическим регистрам можно отнести:

- Региональный регистр облученных лиц из населенных пунктов бассейна реки Теча;
- Отраслевой регистр лиц, имеющих профессиональные заболевания;
- Отраслевой МДР ликвидаторов последствий аварии на ЧАЭС – работников «Росатома»;
- Регистр острых лучевых поражений человека;
- Региональный МДР персонала Сибирского химического комбината (Северск);
- Региональный МДР персонала Горно-химического комбината (Железногорск);
- Национальный радиационно-эпидемиологический Чернобыльский регистр (Обнинск).

На основе регистра персонала Производственного объединения «Маяк» была создана объединенная когорта, которая насчитывает около 57 тыс. работников, для которых имеются оценки доз внешнего излучения, а также для части работников оценены уровни воздействия инкорпорированного плутония. Изучение отдаленных последствий облучения у этой когорты – приоритетное направление мирового уровня новизны.

В ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России с 1985 года ведутся уникальный для мирового сообщества регистр и база данных по острым лучевым поражениям человека [4, 5]. На основе этих данных в 2016–2019 гг. были выпущены русская и английская версии единственного в мире атласа «Острая лучевая болезнь человека» [6, 7], содержащего уникальные данные по клинической картине и дозиметрическим характеристикам более 150 лиц с острыми радиационными поражениями.

Проблеме научной разработки методов и способов защиты населения, оказавшегося в орбите радиационного воздействия аварийных объектов, всегда уделялось большое внимание. Огромный опыт, накопленный в России, освещён в многочисленных публикациях, например [3, 8]. В качестве примера приведем также книгу «Крупные радиационные аварии: последствия и защитные меры», переведенную на английский и японский языки [9], и фундаментальное издание «Радиационная медицина. Руководство для врачей-исследователей и организаторов здравоохранения» в четырёх томах под общей редакцией академика Леонида Андреевича Ильина [10].



Рис. 2. Академик РАН, почетный президент ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России Л.А. Ильин с изданием «Радиационные аварии»



Рис. 3. Научные труды, посвященные разработке методов и способов защиты населения, оказавшегося в районе радиационного воздействия: «Медицинские аспекты противодействия радиологическому и ядерному терроризму», «Радиационная медицина» в 4-х томах, атлас «Острая лучевая болезнь человека» на английском языке

Известно, что клиника ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им А.И. Бурназяна ФМБА России имеет, в силу многих причин, наибольший опыт в диагностике, лечении и медицинской реабилитации больных острой лучевой болезнью [10, т. 2]. На основании накопленного опыта впервые в мировой практике были

разработаны: классификация различных форм лучевых поражений как от внешнего, так и внутреннего облучения человека; принципы биодозиметрии и цитогенетические методы, а также предложены эффективные схемы лечения костномозговой формы острой лучевой болезни и местных лучевых поражений [6, 11].

Одним из активно развивающихся инновационных направлений сегодня является лечение местных лучевых поражений мезенхимальными стволовыми клетками в сочетании с микрохирургической техникой. Получены обнадеживающие экспериментальные результаты: разработанная ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России методика ускоряет заживление раневой поверхности в 2 и более раз. Подробнее с ними можно ознакомиться в международном рецензируемом журнале «Cells» от сентября 2020 года, где опубликована совместная статья специалистов ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России и Института ядерной и радиационной безопасности Франции [12].

В последние годы приоритетными являются научные исследования в области молекулярных, биохимических и генетических механизмов формирования лучевого поражения и пострадиационного восстановления, поскольку ученые сосредоточили свои усилия на изучении роли ДНК и систем ее репарации как одного из ключевых элементов живых систем.

Радиобиологами выполнены исследования, посвященные молекулярным и клеточным механизмам гибели облученных клеток. Эти работы представляют особый интерес как для формирования концептуальных основ патогенеза радиационных поражений, так и для разработки адекватных методов и способов профилактики и терапии лучевых поражений [13–16].

Сегодня для выполнения задач по обеспечению радиационной безопасности персонала и населения крайне необходимы новые высокочувствительные технологии биодозиметрии, которые превосходят традиционно используемые цитогенетические тесты. В настоящее время ведется разработка технологий биодозиметрии радиационных воздействий, позволяющих повысить порог чувствительности до 30–50 мГр, что крайне актуально для восстановления доз как у стажированных работников, так и в результате радиационных аварий [17–20].

Наиболее широкомасштабные экспериментальные работы в области радиотоксикологии выполнены отечественными учёными-медиками с

участием физиков-дозиметристов. Детально изучена радиотоксикология основных биологически значимых радионуклидов: плутония-239, полония-210, цезия-137, стронция-90, йода-131 и других [21–23]. Оценены поражающие дозы на критические органы и красный костный мозг, разработаны радиозащитные препараты [24].

На основе работ по радиотоксикологии были разработаны и внедрены в практику радиофармпрепараты в качестве основы ядерной медицины и лекарственные соединения для предотвращения инкорпорации радиоактивных веществ и стимуляции их выведения из организма.

В 1972 году профессором Николаем Николаевичем Суворовым и его сотрудниками было синтезировано химическое соединение из группы биологических аминов [25]. Лекарственные формы этого соединения были испытаны на различных воинских контингентах, включая экипажи двух атомных подводных лодок, возвратившихся из боевого дежурства.

В результате радиопротектор получил официально название индралин, а его лекарственная форма в таблетках для перорального применения – Б-190, в честь Аветика Игнатьевича Бурназяна. Масштаб проводимых доклинических и клинических экспериментальных исследований радиопротекторов сегодня сопоставим с масштабом современных исследований для лечения новой коронавирусной инфекции.

Не случайно многие проводят аналогию между COVID и радиацией: оба врага невидимы, оба представляют серьезную опасность для жизни и здоровья людей. В настоящее время Б-190 является табельным препаратом профилактического и немедленного применения при гамма- и гамма-нейтронном облучении на объектах ГК «Росатом», Минобороны, МЧС и других организациях. Препарат Б-190 включён также в противоаварийную аптечку персонала ГК «Росатом».

В качестве радиопротектора экстренного действия в течение 2–3 часов после облучения рекомендован также бета-лейкин отечественного производства и в качестве средства комплексного лечения острой лучевой болезни оригинальный препарат на основе ДНК-дезоксинат (деринат).

В отечественной линейке средств защиты от инкорпорации наиболее биологически значимых радионуклидов разработаны: препарат стабильного йода (КJ) в дозировке для взрослых и детей – при воздействии радионуклидов йода; сорбент ферроцин – для связывания в желудочно-кишечном тракте

радиоактивного цезия; ионообменные сорбенты адсорбар и полисурмин – для поглощения радионуклидов стронция.

<p>Радиопротекторы</p> <ul style="list-style-type: none">• Индралин• Б-190 – индралин в форме таблеток <p><i>Назван в честь А.И. Бурназяна</i></p>  <p>Б-190 – препарат профилактического и немедленного применения при гамма- и гамма-нейтронном облучении</p> <p>Включён в противоаварийную аптечку персонала ГК «Росатом»</p>	<p>Препараты для раннего лечения ОЛБ и МЛП</p> <ul style="list-style-type: none">• Рибоксин• Латран• Дезоксинат• Продигозан• Беталейкин• Лиоксазол• Лиоксазин
	<p>Препараты для выведения радионуклидов из организма</p> <ul style="list-style-type: none">• Йодид калия• Ферроцин• Альгисорб• Цинкацин• Пентацин

Рис. 4. Отечественные фармакологические средства защиты

Для ускорения выведения из организма радиоактивных веществ применяются комплексообразующие препараты: оксатиол для борьбы с инкорпорацией полония-210, пентацин-ДТПА (тринатрийкальциевая соль дитилентриаминпентауксусной кислоты) и соответственно цинковая соль этого соединения – цинкацин для стимуляции выведения радиоактивных изотопов редкоземельных элементов, плутония и трансплутониевых элементов.

Среди различных методов и способов защиты человека от техногенного облучения исключительная роль принадлежит регламентации (нормированию) радиационного воздействия на людей и их жёсткому соблюдению. Инициатором этих работ был академик И.В. Курчатов.

В начале 1949 года он поручил Институту биофизики разработку и обоснование временных предельно допустимых уровней облучения профессиональных работников от воздействия осколочных радионуклидов – продуктов деления урана и плутония. Заодно Игорь Васильевич передал учёным, в то время строго секретные, сведения о свойствах этих радиоактивных веществ.

В 1952 году при Министерстве здравоохранения СССР была создана Национальная Комиссия по радиационной защите, основной задачей которой была разработка общегосударственных норм радиационной безопасности. Их выполнение было обязательно для всех предприятий, где применяются, производятся, перерабатываются, хранятся и транспортируются радиоактивные вещества.

В 1960 г. были утверждены первые допустимые уровни. Затем разработаны «Нормы радиационной безопасности» и «Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности». На основе многолетнего опыта радиационно-гигиенического сопровождения работ на всех звеньях ядерного топливного цикла были разработаны «Санитарные правила проектирования предприятий и установок атомной промышленности» и «Санитарные правила проектирования и эксплуатации атомных станций». В настоящее время нами закончена разработка нового регулирующего документа – Санитарных правил «Обеспечение радиационной безопасности при выводе из эксплуатации блока атомной станции».

В результате внедрения в практику этих разработок отечественных учёных и с учётом строго соблюдаемой производственной дисциплины на объектах ГК «Росатом» в настоящее время по данным дозиметрического мониторинга, среднегодовая доза облучения персонала не превышает установленной нормами радиационной безопасности-2009 величины – 20 мЗв в год и составляет доли от этого значения (рис. 5).

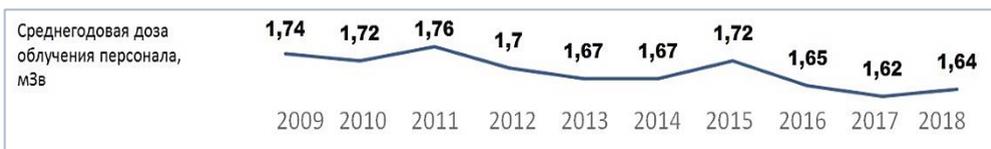


Рис. 5. Динамика доз облучения персонала ГК «Росатом», 2009–2018 гг.

Опыт радиационно-гигиенических работ в период создания и функционирования предприятий атомной индустрии определил требования учёных-медиков о необходимости создания трехзональной системы при планировании, строительстве и эксплуатации этих объектов. Речь идет о последовательности прохождения работников из т.н. «грязных» зон радиоактивного загрязнения в чистые помещения под постоянным

дозиметрическим контролем. Внедрение этого принципа защиты против радиации сыграло огромную роль в обеспечении радиационной безопасности профессиональных работников.

Относительно соблюдения регламентов, о которых мы говорили ранее, можно привести следующий факт: по сравнению с 2000 годом число работников ядерного топливного цикла, имеющих индивидуальную эффективную дозу облучения 20 мЗв/год, к сегодняшнему дню снизилось с 547 человек практически до единичных случаев. Напомним, что под дозиметрическим контролем в ГК «Росатом» состоит 65 600 профессиональных работников. За последние 23 года среди работников корпорации не было зафиксировано случаев острой лучевой болезни, лишь два случая местных радиационных поражений были установлены в 2012 году.

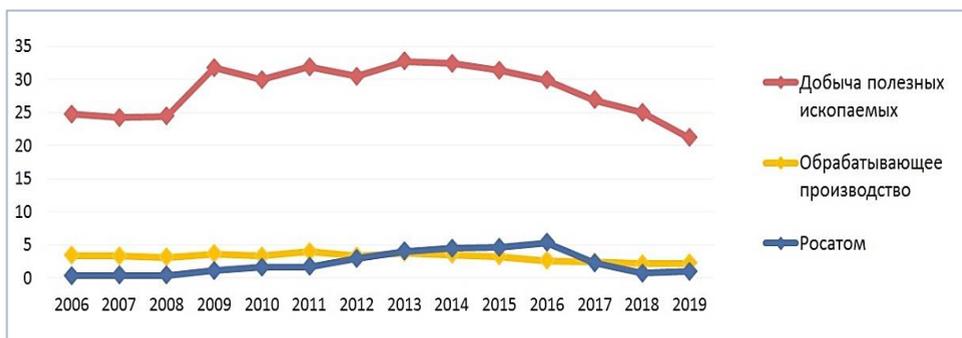


Рис. 6. Динамика профессиональной заболеваемости работников различных отраслей промышленности

Благодаря реализации научно обоснованной системы медицинского обслуживания и санитарно-гигиенического регулирования в области радиационной безопасности показатели профессиональной заболеваемости, которые с учетом данных ведомственного регистра о профессиональных заболеваниях среди работников ГК «Росатом» в сравнении с профессиональной заболеваемостью в других отраслях промышленности, демонстрируют весьма невысокие параметры (см. рис.6), а вклад заболеваний, которые можно связать с радиационным фактором, составляет единицы процентов. Это единичные случаи, где в качестве причины профессиональных заболеваний ионизирующее излучение на протяжении многих последних лет

вызывает только онкологические заболевания у стажированных работников в горнорудном уранодобывающем производстве.

В последние годы по инициативе руководства Госкорпорации «Росатом» выполняется амбициозная программа, получившая название «Прорыв», посвященная разработке ядерных энерготехнологий нового поколения и новой платформы ядерной энергетики. Это разработка замкнутого ядерного топливного цикла на базе реакторов на быстрых нейтронах, работающих на новом виде ядерного топлива – смешанном нитридном уран-плутониевом.

Имея большой опыт исследовательских работ по медико-гигиеническому и дозиметрическому сопровождению разработки технологий и производства оксидного уран-плутониевого топлива и регенерированного урана, в настоящее время учёные и специалисты ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России изучают радиационную обстановку и готовят медико-технические требования к обеспечению радиационной безопасности персонала опытного демонстрационного комплекса, создаваемого на одном из атомных комбинатов.

Следующим этапом будет обоснование проектных решений и требований для обеспечения радиационной безопасности при промышленной реализации проекта «Прорыв» для профессиональных работников и населения, проживающего в зоне его влияния.

В рамках дальнейшего совершенствования медико-санитарного обеспечения работников атомной индустрии приоритетными являются следующие научно-практические направления:

1) совершенствование и разработка новых медико-санитарных технологий, направленных на обеспечение радиационной безопасности;

2) завершение создания единой системы радиационно-гигиенического реагирования и медицинских аспектов защиты людей в случае радиационных аварий;

3) дальнейший поиск и разработка методов и средств профилактики и лечения лучевой патологии человека, включая новые инновационные биомедицинские технологии;

4) совершенствование методологии изучения отдаленных последствий облучения персонала радиационно-опасных объектов и населения;

5) осуществление специалистами ФМБА России международного взаимодействия по ядерному обнаружению, ситуационному реагированию и

противодействию ядерному терроризму [26], это новое научное направление – медико-биологическая ядерная криминалистика;

б) постепенный переход к профилактическому направлению в отношении выявления профессиональных и социально-значимых заболеваний, вносящих основной вклад в трудопотери атомной отрасли.

Одним из важнейших направлений в области защиты человека от воздействия радиоактивных веществ является проведение научных исследований и разработок для создания средств индивидуальной защиты.

В начальный период становления атомной отрасли, когда концентрация радиоактивных аэрозолей в воздухе рабочих зон в большинстве случаев превышала нормативные значения в сотни и тысячи раз, исключительно актуальной задачей было создание средств защиты органов дыхания.

Примером успешного решения этой проблемы было создание в конце 50-х годов прошлого столетия знаменитых одноразовых респираторов ШБ-1 «Лепесток» из т.н. петряновской фильтрующей ткани по имени выдающегося отечественного учёного академика Игоря Васильевича Петрянова-Соколова (см. рис.7). Их эффективность при малом сопротивлении дыханию достигала 99%. Эта работа была отмечена Ленинской премией [27].



Рис. 7. Авторы респиратора ШБ-1 «Лепесток-200»
С.Н. Шатский, И.В. Петрянов-Соколов, С.М. Городинский, П.И. Басманов

К началу 2019 года выпуск ШБ-1 «Лепесток» достиг 6 миллиардов экземпляров, и они с успехом используются во многих отраслях промышленности.

На рис. 8 представлены разработанные при участии специалистов Института биофизики изолирующие костюмы для работы с радиоактивными веществами, в том числе с принудительной подачей воздуха.



Рис. 8. Средства индивидуальной защиты

Отвечая на запросы времени, ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России совместно с ФГБУ НИЦЭМ им. Н.Ф. Гамалеи Минздрава России разработали технологию радиационной обработки спецодежды, применяемой при работе с коронавирусной инфекцией с целью её повторного использования в случае чрезвычайных ситуаций.

Возвращаясь к проблеме радиационных аварий, отметим, что по данным регистра ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России в общей сложности в СССР и в России произошло 352 радиационных аварии в учреждениях гражданского профиля и на объектах атомной промышленности Министерства обороны.

На рис. 9 приведена таблица с указанием всех случаев радиационных аварий, произошедших на территории СССР и Российской Федерации.

Общее число инцидентов составило 748 случаев, из них острая лучевая болезнь (ОЛБ) различной степени тяжести установлена у 352 человек, летальный исход – у 70 человек. Наибольшее число случаев ОЛБ – 134, произошло в результате аварии на ЧАЭС. Речь идет о двух контингентах – свидетелей аварии и пожарных. Среди т.н. ликвидаторов – контингента людей, привлечённых к аварийным работам на ЧАЭС и в 30-км зоне, случаев ОЛБ установлено не было, равно как и у населения, проживавшего в зонах радиоактивного загрязнения [4, 5].

Вид инцидента	Число инцидентов	Число пострадавших		
		всего	с ОЛБ	умершие
Инциденты с источниками излучений	90	154	45	15
Рентгеновские установки и ускорители	43	52	-	-
Реакторные инциденты и потеря контроля над критичностью делящегося материала <i>(без ЧАЭС 1986 г.)</i>	33	82	73	13
Чернобыльская авария 1986 г.	1	134	134	28
Случаи с МЛП на ПО «Маяк» <i>(1949-1956 гг.)</i>	168	168	-	-
Аварии на атомных подводных лодках и нештатные ситуации на ядерных испытаниях	5	141	93	12
Другие инциденты	12	17	7	2
Итого	352	748	352	70

Рис. 9. Регистр радиационных аварий и инцидентов на территории СССР и России (1949–2016 гг.)

Через год после событий в Чернобыле Институт Биофизики направил фундаментальный отчёт в Научный Комитет по действию атомной радиации Организации Объединенных Наций – наиболее авторитетный в мире научный орган в этой области. В докладе Генеральной Ассамблее ООН в 1988 году этот Комитет следующим образом оценил деятельность учёных-медиков: «Представленная СССР информация является исчерпывающей и очень ценной. Комитет считает, что он в долгу перед всеми авторами за их готовность поделиться своим опытом и желает отметить их профессиональное мастерство и человеческое сострадание, проявленное в связи со столь трагическими обстоятельствами» [28].

Проблеме научной разработки методов и способов защиты населения, оказавшегося в орбите радиационного воздействия аварийных объектов, всегда уделялось большое внимание. В историческом контексте следует напомнить, что ещё за 19 лет до Чернобыльской аварии отечественными учёными на основании собственных экспериментальных данных и испытаний на добровольцах была составлена и утверждена Минздравом СССР «Инструкция по йодной профилактике в случае радиационных аварий на ядерных реакторах», а в 1970 году Минздравом СССР были утверждены несекретные «Временные методические указания для разработки мероприятий по защите населения в случае аварий ядерных реакторов», подготовленные также под руководством Института биофизики [29].

В рамках анализа радиационных аварий – чернобыльская катастрофа, прежде всего в силу её глобальных масштабов, занимает особое место.

Напомним, что в результате этой аварии радиоактивному загрязнению (внутри изолинии 1 Кюри/км²) подверглась территория европейской части СССР площадью около 150 тысяч кв. км, на которой проживало порядка 6,2 млн человек. В кратчайшие сроки было необходимо решить задачу выработки научно обоснованной стратегии действий государства по защите населения в этой беспрецедентной и жизненно важной ситуации.

Группой учёных, работавших на аварийном объекте в сотрудничестве со специалистами Госкомгидромета и Агропрома, под научным руководством академиков Л.А. Ильина и Ю.А. Израэля в течение двух недель после аварии были разработаны впервые в мировой практике «Рекомендации по критериям возможности проживания населения, необходимости отселения и временной эвакуации на территории, подвергшейся радиоактивному загрязнению в результате аварии на ЧАЭС» (рис. 10).

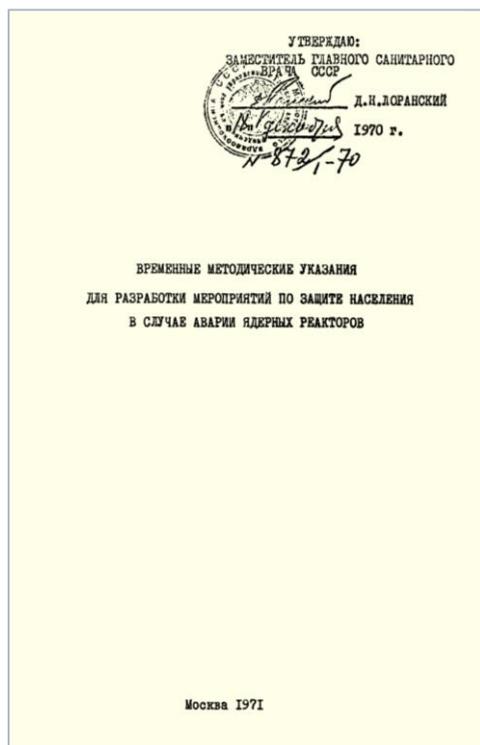


Рис 10. «Временные методические указания для разработки мероприятий по защите населения в случае аварий ядерных реакторов»

В этом документе, утверждённом на высшем уровне 22 мая 1986 года, были установлены аварийные регламенты облучения населения – 100 мЗв за первый год после аварии (с последующим снижением этой величины) и впервые осуществлено зонирование территорий по уровням гамма-излучения на местности. В зонах с высокими уровнями радиоактивного загрязнения (в т.н. зонах жёсткого контроля), где без принятия мер ограничения жизнедеятельности населения дозовые нагрузки на людей могли превысить 100 мЗв/год, проживало 273 тысячи человек в 789 населённых пунктах.

В этих зонах, согласно «Рекомендациям», были введены способы ограничения жизнедеятельности населения – запрет на потребление молока и местных пищевых продуктов с заменой на «чистые» продукты, с преимущественным пребыванием людей в зданиях, чем на открытой местности, и т.п. В результате удалось снизить дозовую нагрузку в 3 раза по сравнению с установленными регламентами.

Обеспечение радиационной безопасности населения, проживавшего в зонах радиоактивного загрязнения, потребовало многочисленных расчетов допустимых уровней внутреннего облучения, т.к. временный аварийный норматив – 100 мЗв общего облучения. В этот же период были разработаны методические рекомендации по радиационно-гигиеническому контролю на местах и на соответствующих предприятиях по производству пищевых продуктов. Все эти мероприятия по защите людей, включая анализ радиационной обстановки и дозовые нагрузки на население пострадавших районов позволили сделать предварительный прогноз возможных отдалённых последствий в виде онкологической заболеваемости среди населения [3].

Этот прогноз, сделанный отечественными учёными-медиками – профессионалами, – свидетельствовал о практически крайне малой вероятности заболеваний радиационно индуцированными лейкозами и солидарными раками, кроме ожидаемого роста числа злокачественных опухолей щитовидной железы у детского населения. В последнем случае это стало очевидным из-за административных, организационных, бюрократических и других причин, необходимых для практической реализации ранее разработанных методов и способов йодной профилактики и других рекомендаций задолго до чернобыльской аварии. Указанные выше прогнозы были, в частности, подтверждены рядом зарубежных и отечественных специалистов.

В результате аварии на ЧАЭС также остро встал вопрос о судьбах трехмиллионного населения г. Киева – столицы Украины, так как 7 мая 1986 г. Политбюро ЦК Украины планировало эвакуацию всего детского населения, а следовательно, и большинства взрослых в т.н. «чистые» районы.

Основываясь на научных данных о радиационной обстановке и её прогнозе Ю.А. Израэль и Л.А. Ильин на заседании Политбюро выступили против этого предложения. В результате эта акция с очевидными тяжелыми социально-экономическими последствиями была предотвращена, а обоснованность позиции учёных была в дальнейшем полностью подтверждена.

В заключение отметим, что впервые за всю историю нашей страны Академия наук посвящает научную сессию общего собрания юбилейной дате отдельной отрасли. История атомного проекта свидетельствует не о вкладе Академии наук в развитие атомной отрасли, а наоборот, о её приоритетной роли в этом эпохальном событии.

Пророческие слова выдающегося российского учёного-физиолога академика Ивана Петровича Павлова, сказанные им более 100 лет тому назад, в 1914 году, как никогда созвучны проблемам сегодняшнего дня: *«... Что нам, русским, нужно сейчас в особенности – это пропаганда научных стремлений, обилие научных средств и страстная научная работа. Очевидно, что наука становится главным рычагом жизни народов; без нее нельзя удержать ни самостоятельность, ни, тем более, достойного положения в мире».*

Литература

1. Наука и общество: история советского атомного проекта (40–50-е годы) / Труды международного симпозиума ИСАП-96. – М.: ИздАТ, 1997. – 608 с.
2. Емельянов Б.М. Лаборатория «Б». Сунгульский феномен / Б.М. Емельянов, В.С. Гаврильченко. – Снежинск: Изд-во РФЯЦ-ВНИИТФ, 2000. – 438 с.
3. Ильин Л.А. Реалии и мифы Чернобыля / Л.А. Ильин. – 1-е изд. 1994, 2-е изд. испр. и доп. – М.: НПП «ALARA», 1996. – 473 с. Издание на английском языке 1995 г., на японском языке 1998 г.
4. Ильин Л.А., Соловьев В.Ю. Непосредственные медицинские последствия радиационных инцидентов на территории бывшего СССР // Медицинская радиология и радиационная безопасность. – 2004, № 6, т. 49. С. 37–48.
5. Соловьев В.Ю. Острые радиационные поражения у пострадавших в радиационных инцидентах на территории бывшего СССР 1949–1991 гг. и Российской

Федерации 1992–2015 гг. (обзор) / В.Ю. Соловьев, А.С. Самойлов, А.Ю. Бушманов, Л.А. Ильин // Ядерные технологии на страже здоровья: сборник тезисов Международного научно-практического форума. – М.: ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, 2016. С. 24–26.

6. Острая лучевая болезнь человека. Атлас. / А.В. Барабанова, А.Е. Баранов, А.Ю. Бушманов и др.; под ред. А.С. Самойлова и В.Ю. Соловьева. – М.: ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, 2016–2017. – в 2-х частях:

Часть I. Пострадавшие при радиационной аварии на ЧАЭС 1986 г. 2016. – 140 с.

Часть II. Пострадавшие при других радиационных авариях, кроме радиационной аварии на ЧАЭС 1986 г. 2017. – 110 с.

7. ATLAS. ACUTE RADIATION SYNDROME. / A.V. Varabanova, A.E. Baranov, A.Yu. Bushmanov et al.; ed. by A.S. Samoilov and V.Yu. Soloviev. – М.: SRC-FMBC. 2019. – 232 p.

8. Организация санитарно-гигиенических и лечебно-профилактических мероприятий при радиационных авариях: руководство / Г.М. Аветисов, Е.Б. Антипин, А.В. Барабанова и др.; под ред. Л.А. Ильина. – М.: ФГУ «Всерос. центр медицины катастроф «Защита» Росздрава», 2005. – 522 с.

9. Крупные радиационные аварии: последствия и защитные меры / Р.М. Алексахин, Л.А. Булдаков, В.А. Губанов и др.; под ред. Л.А. Ильина, В.А. Губанова. – М.: ИздАТ, 2001. – 751 с. В 2002 г. издано в Японии, в 2004 издано на английском языке.

10. Радиационная медицина. Руководство для врачей-исследователей и организаторов здравоохранения: в 4-х томах / Под общ. ред. Л.А. Ильина. – М.: ИздАТ, 1999–2004:

Т.1. Теоретические основы радиационной медицины – 2004. – 992 с.

Т.2. Радиационные поражения человека – 2001. – 432 с.

Т.3. Радиационная гигиена – 2002. – 608 с.

Т.4. Гигиенические проблемы неионизирующих излучений – 1999. – 304 с.

11. Гуськова А.К., Галстян И.А., Гусев И.А. Авария Чернобыльской атомной станции (1986 – 2011): последствия для здоровья, размышления врача. / Под общ. ред. А.К. Гуськовой. – М.: ФМБЦ им. А.И. Бурназяна, 2011. – 254 с.

12. Brunchukov V. Evaluation of the Effectiveness of Mesenchymal Stem Cells of the Placenta and Their Conditioned Medium in Local Radiation Injuries. / V. Brunchukov, T. Astrelina, D. Usupzhanova et al. // Cells. – 2020. – 9 (12). – 2558.

13. Озеров И.В., Осипов А.Н. Особенности индукции и репарации двунитевых разрывов ДНК в клетках млекопитающих при действии редкоизионизирующего излучения с различной мощностью дозы. – М.: ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, 2016. – 102 с.

14. Tsvetkova A. γ H2AX, 53BP1 and Rad51 protein foci changes in mesenchymal stem cells during prolonged X-ray irradiation. / A. Tsvetkova. I.V. Ozerov, M. Pustovalova et al. // Oncotarget, 2017 – 8(38) – 64317-64329.

15. Osipov A.N. Activation of homologous recombination DNA repair in human skin fibroblasts continuously exposed to X-ray radiation. // A.N. Osipov, A. Grekhova, M. Pustovalova et al. // Oncotarget, 2015 – 6(29) – 26876-26885.

16. Babayan N. Low repair capacity of DNA double-strand breaks induced by laser-driven ultrashort electron beams in cancer cells. // N. Babayan, N. Vorobyeva, B. Grigoryan B. et al. // *International Journal of Molecular Sciences*. – 2020. – 21(24) – pii 9488.

17. *Rapid Diagnosis in Populations at Risk from Radiation and Chemicals*. Editors: A. Cebulska-Wasilewska, A.N. Osipov and F. Darroudi – IOS Press: Volume 73 NATO Science for Peace and Security Series. – E: Human and Societal Dynamic. – November 2010. – 392 p.

18. Pustovalova M. Residual γ H2AX foci induced by low dose x-ray radiation in bone marrow mesenchymal stem cells do not cause accelerated senescence in the progeny of irradiated cells. / M. Pustovalova, T.A. Astrelina, A. Grekhova A. et al. // *Aging (Albany NY)*. – 2017. – 9 (11) – 2397-2410.

19. Osipov A.N. Low Doses of X-rays Induce Prolonged and ATM-independent Persistence of γ H2AX Foci in Human Gingival Mesenchymal Stem Cells. / A.N. Osipov, M. Pustovalova, A. Grekhova et al. // *Oncotarget*. – 2015. – 6(29) – 27275-27287.

20. Ulyanenko S. Formation of γ H2AX and pATM Foci in Human Mesenchymal Stem Cells Exposed to Low Dose-Rate Gamma-Radiation / S. Ulyanenko, M. Pustovalova, S. Koryakin et al. // *International Journal of Molecular Sciences*. – 2019. – 20(11). – 2645.

21. Радиоактивный йод в проблеме радиационной безопасности / Л.А. Ильин, Г.В. Архангельская, Ю.О. Константинов, И.А. Лихтарев; под ред. Л.А. Ильина. – М.: Атомиздат, 1972. – 270 с.

22. Плутоний. Радиационная безопасность / Ю.В. Абрамов и др.; под общ. ред. Л.А. Ильина; науч. ред. О.А. Кочетков, С.А. Романов. – М.: ИздАТ, 2005. – 415 с.

23. Радиационная безопасность при работе с полонием-210 / Н.Б. Борисов, Л.А. Ильин, У.Я. Маргулис и др.; под ред. И.В. Петрянова, Л.А. Ильина. – М.: Атомиздат, 1980. – 262 с.

24. Радиобиология инкорпорированных радионуклидов / В.С. Калистратова, И.К. Беляев, Е.С. Жорова и др.; под ред. Калистратовой В.С. – изд. 2-е, переработанное. – М.: ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, 2016. – 556 с.

25. Индралин-радиопротектор экстренного действия. Противолучевые свойства. Фармакология, механизм действия, клиника / Л.А. Ильин, Н.М. Рудный, Н.Н. Суворов и др. – М.: Из-во МЗ РФ, 1994. – 436 с.

26. Медицинские аспекты противодействия радиологическому и ядерному терроризму / М.И. Грачев, Л.А. Ильин, Ю.Е. Квачева и др.; под общ. ред. Л.А. Ильина. – М.: ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, 2018. – 392 с.

27. Лепесток. Лёгкие респираторы / И.В. Петрянов, Ф.С. Кошечев, П.И. Басманов и др. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука, 2015. – 320 с.

28. Резолюции 43-й сессии Генеральной Ассамблеи ООН (1988–1989 годы) <https://www.un.org/ru/ga/43/docs/43res.shtml>.

29. Временные методические указания для разработки мероприятий по защите населения в случае аварии ядерных реакторов / И.К. Дибобес, Л.А. Ильин, В.М. Козлов и др. – М.: Из-во МЗ РФ, 1971. – 46 с.

А.Г. Арбатов¹

ГЛОБАЛЬНАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ В ЯДЕРНОМ МИРЕ²

«Глобальная стабильность» – весьма неопределенное понятие, подразумевающее мир без войн и нарушений международного права, международную гармонию и всеобщую безопасность.

Понятно, что состояние современного мира очень отличается от такой идеальной модели, хотя к ней следует по возможности стремиться. В то же время поиск путей продвижения в указанном направлении требует анализа не желаемого, а существующего порядка вещей, в том числе в сфере ядерного оружия и контроля над вооружениями. Именно на этом анализе должны основываться предложения по продвижению к намеченной цели.

Поэтому названную тему предпочтительно толковать как проблему «стратегической стабильности», которая относится к ядерным вооружениям глобальной дальности действия. Понятие «стратегической стабильности» в последнее время используется политиками субъективно и весьма произвольно, что усугубляет противоречия по этому вопросу, для которых и без того есть серьезные объективные причины. Между тем эта концепция имеет достаточно конкретное для научного анализа содержание. Она вполне определенно связана с доктринами и средствами «ядерного сдерживания», лежащего в основе национальной безопасности и стратегических отношений великих держав.

1. Суть стратегической стабильности

Как показал опыт холодной войны, без договоров по ограничению ядерного оружия (ЯО) ядерное сдерживание стимулирует гонку вооружений, периодически обостряет угрозу ядерной войны и влечет большие материальные затраты. Исходя из этого опыта, уже с 1960-х годов началось создание системы контроля над ядерным оружием. Его важнейшими вехами

¹ Руководитель Центра международной безопасности ИМЭМО им. Е.М. Примакова РАН, академик РАН.

² Статья опубликована в рамках проекта «Посткризисное мироустройство: вызовы и технологии, конкуренция и сотрудничество» по гранту Министерства науки и высшего образования РФ на проведение крупных научных проектов по приоритетным направлениям научно-технологического развития.

были Договоры о прекращении ядерных испытаний в атмосфере, под водой и в космосе (1963 г.), о запрещении вывода ЯО в космическое пространство (1967 г.) и о нераспространении ядерного оружия (1968 г.). Затем процесс контроля был перенесен непосредственно на носители ядерного оружия и привел к первому успеху: Договору по ограничению систем противоракетной обороны (ДПРО) и соглашению об ограничении наступательных стратегических вооружений (ОСВ-1) в 1972 г.

Поначалу переговоры по стратегическим вооружениям опирались на принцип паритета («равенства и одинаковой безопасности»), но с внедрением в 1970-е годы многозарядных баллистических ракет (с разделяющимися головными частями индивидуального наведения – РГЧ ИН) этот принцип оказался недостаточно емким. Теоретически системы РГЧ ИН позволяли нанесение обезоруживающего ядерного удара по противнику даже в условиях паритета сторон по носителям и ядерным боезарядам.

Тогда в основу соглашений по ограничению и сокращению наступательных стратегических вооружений (СНВ) был поставлен принцип «стратегической стабильности» (рис. 1). Он служил фундаментом переговоров в последние 30 лет и тем самым стал связующим звеном между ядерным сдерживанием и международной безопасностью.



Рис. 1. Стратегическая стабильность

Понятие «стратегическая стабильность» было сформулировано как правовая норма в июне 1990 г. в Совместном Заявлении Советского Союза и Соединенных Штатов Америки [1].

Это понятие определялось как стратегические отношения, *устраняющие стимулы для нанесения первого ядерного удара*. Для формирования таких отношений будущие договоры о сокращении стратегических наступательных вооружений (СНВ) должны были включать ряд согласованных элементов:

- *взаимосвязь между стратегическими наступательными и оборонительными вооружениями* (чтобы оборона не могла ослабить ответный удар другой стороны);

- *уменьшение концентрации боезарядов на стратегических носителях* (чтобы одним носителем с несколькими боезарядами нельзя было поразить на стартовых позициях несколько носителей противника с гораздо большим числом боезарядов);

- *оказание предпочтения средствам, обладающим повышенной выживаемостью* (чтобы их невозможно было уничтожить до запуска упреждающим ударом).

Важно подчеркнуть, что эти принципы не являлись теоретическими построениями, а были согласованы в качестве рабочей схемы Договора СНВ-1 (1991 г.). В дальнейшем они нашли отражение в шести последующих договорах, включая текущий Договор СНВ-3 (от 2010 г.). По согласованным критериям стратегической стабильности нынешний стратегический баланс России и США выглядит намного более устойчивым и исключает возможность, а значит, и стимулы первого ядерного удара (см. рис. 2). Стратегические боезаряды были сокращены в 7 раз, носители – в 3 раза, доля живучих систем заметно увеличилась.

По всем реалистическим моделям обмена массированными ядерными ударами, которые служили отправной точкой концепции стратегической стабильности в 1990 г., ракетно-ядерный баланс России и США в настоящее время более стабилен, чем когда-либо в прошлом. Это выражается в том, что ни одна из двух сторон не имеет возможности в реалистически вообразимых условиях нанести первый ядерный удар, который настолько обезоружит противника, что позволит отразить его ослабленный ответный удар с помощью систем стратегической обороны (ПРО и ПВО). Причем в первом ударе будет израсходовано больше ядерных вооружений, чем окажется поражено, а для

ответного удара у другой стороны останется больше средств, чем сохранится в резерве у агрессора [2].

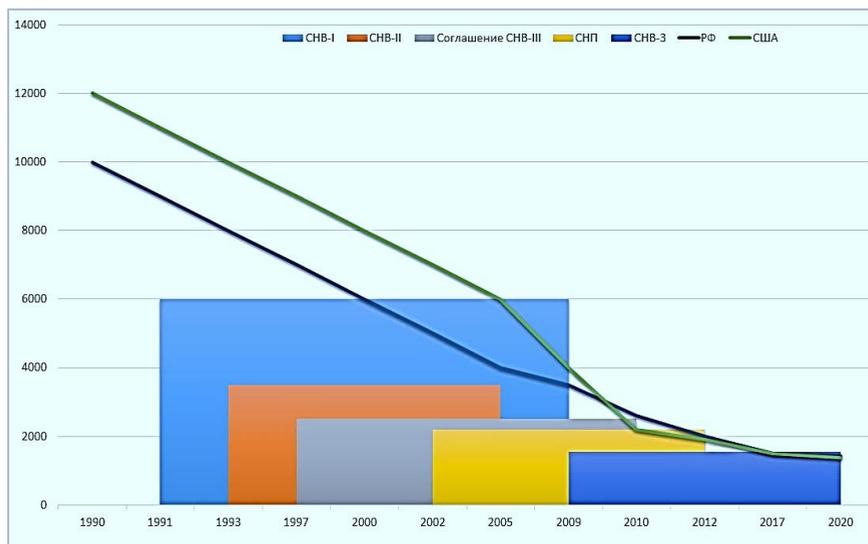


Рис. 2. Ядерные боезаряды и договоры СНВ

Эти оценки не учитывают возможность ответно-встречного удара, осуществимость которого зависит от безотказной работы систем предупреждения о ракетном нападении (СПРН) и всех звеньев боевого управления стратегических сил.

Учет возможностей нападения с применением высокоточных наступательных вооружений в неядерном оснащении, как и с использованием существующих оборонительных систем для отражения ответного удара, не вносит существенных изменений в эти выводы. Иными словами, ныне нет возможности совершить ядерную агрессию и избежать возмездия с неприемлемым ущербом.

Тем не менее, как ни парадоксально, в силу ряда обстоятельств стратегическая стабильность в настоящее время опасно расшатывается, то есть снижается ее эффективность в выполнении своей главной миссии – предотвращении ядерной войны. Эти обстоятельства связаны с распадом режимов контроля над ядерным оружием, изменением общего, и в том числе ядерного миропорядка, а также военно-техническим развитием. Все эти моменты вызывают к жизни новые стратегические и оперативные концепции, повышающие опасность ядерной войны в вероятной кризисной ситуации.

2. Распад контроля над вооружениями

За последние два года кризис контроля над вооружениями стал настолько очевидным, что был признан на высшем уровне власти России, многих европейских государств и в оппозиционных кругах США. В октябре 2020 г. на валдайской встрече президент В. Путин выразился вполне определенно: «...У мира не будет будущего, если не будет каких-то ограничений в сфере гонки вооружений...» [3].

Что касается США, то ушедшая администрация Д. Трампа не только не разделяла эти опасения, но сделала больше, чем любое другое правительство США, для разрушения системы контроля над вооружениями. Достаточно вспомнить отказ от продления Договора СНВ-3, выход США из Договора РСМД, Договора по Открытому Небу, из соглашения по ядерной программе Ирана (СВДП), неприкрытые угрозы выхода из Договора по запрещению ядерных испытаний (ДВЗЯИ). В этой деструктивной деятельности Трамп намного превзошел своего республиканского предшественника Дж. Буша (мл.), который денонсировал Договор по ПРО в 2002 г.

Представители администрации Дж. Байдена пытаются восстановить разрушенное республиканцами. Но очевидно это будет непросто в силу нескольких главных причин.

Во-первых, помимо контроля над вооружениями, в других сферах политических, экономических и идеологических отношений противоречия России и США, по всей вероятности, обострятся, а отделить контроль над вооружениями от политического контекста отношений государств очень трудно, о чем свидетельствует полувековой опыт ядерного разоружения.

Во-вторых, проблемы контроля над вооружениями объективно усложняются и требуют больших политических и интеллектуальных инвестиций, терпения и государственной мудрости для своего решения.

Так было и раньше, мир не стоял на месте. Но за последние полвека переговоров в этом процессе не бывало столь длительной десятилетней паузы, какая имела место после подписания Договора СНВ-3 (2010 г.). И это, в-третьих.

Наконец, в-четвертых, в политических и экспертных кругах изначально в США, а вслед за этим и в России в последние годы расширяется мнение, что кризис разоружения объективно неизбежен ввиду коренных перемен в миропорядке и появлении революционных военных технологий. Но этот

кризис, как утверждается, не очень опасен, можно упразднить традиционные переговоры и соглашения по ограничению и сокращению конкретных вооружений и впредь обходиться без него. А взамен вести диалоги между ядерными державами в разных форматах и на разных уровнях о новой модели стратегической стабильности. Последняя, по этому мнению, должна основываться не на контроле над конкретными вооружениями, а на новых правилах ядерного сдерживания, мерах сдержанности, предсказуемости и транспарентности гонки вооружений [4].

3. Дестабилизирующие факторы – новый миропорядок

Доводы в пользу упразднения системы и процесса контроля над вооружениями, как и предлагаемые невнятные альтернативы, не выдерживают критики. Вместе с тем очевидно, что тридцать лет спустя после документа 1990 г. концепция стратегической стабильности требует обновления с учетом изменившихся условий и новых угроз.

Первый и наиболее политически заметный дестабилизирующий фактор связан с формирующейся ядерной многополярностью стратегического баланса, тогда как концепция 1990 г. и основанные на ней соглашения были приурочены к ядерной биполярности СССР/РФ – США.

Однако в настоящее время ядерным оружием, помимо двух сверхдержав, обладают еще 7 государств: Великобритания, Франция, КНР, Индия, Пакистан, Израиль и КНДР. Причем некоторые из них, как Китай, Индия, Пакистан, КНДР, ведут последовательные программы наращивания и совершенствования своих ядерных сил.

Это вызывает в России и США настроения в пользу перехода с двустороннего на многосторонний формат переговоров и соглашений об ограничении и сокращении ЯО. Причем по мере глубокого сокращения сил двух держав такая линия обретает все более сильную поддержку.

Так, например, в начале 2012 г., выступая в Сарове, будущий президент России В. Путин заявил: «Мы не будем разоружаться в одностороннем порядке... В ходе этого процесса должны принимать участие уже все ядерные державы» [5]. Это было сказано через год после ратификации Договора СНВ-3, который завершил тридцатилетний период глубокого сокращения ядерного оружия СССР/России и США.

Тогда эта идея не получила поддержки других держав, однако еще через семь лет ее подхватила администрация Дональда Трампа, призвав присоединиться к процессу КНР. Но теперь этот почин не одобрила Москва, поддержав китайский отказ со ссылкой на большое отставание КНР от двух сверхдержав по величине ядерного потенциала [6]. Тем не менее Россия не преминула вспомнить советское требование о подключении к разоружению Великобритании и Франции – с тем же нулевым эффектом, что и прежде.

Идея многостороннего ядерного разоружения воплощена в известной Статье VI Договора о нераспространении ядерного оружия (ДНЯО), которая обязывает ядерные державы: «в духе доброй воли вести переговоры об эффективных мерах по прекращению гонки ядерных вооружений в ближайшем будущем и ядерному разоружению» [7, с. 447]. Вопреки распространенному мнению, третьи ядерные государства (как и многие неядерные) принимают практическое участие в ядерном разоружении в части запрещения различных видов ядерной деятельности¹. Однако договорно-правовое ограничение ядерных вооружений как таковых – то есть средств доставки и боезарядов – осталось уделом двустороннего процесса СССР/России и США².

Причина в том, что ядерное оружие в каждой стране создается не походя, как побочный продукт ядерной науки и энергетики, а основывается на исторических по своему значению политических решениях высшего государственного руководства. Выполнение таких решений превращается в долговременный курс с огромными затратами материальных и интеллектуальных ресурсов и связывается с кардинальными интересами обороны и национальной безопасности. Сюда относятся:

сдерживание ядерной агрессии угрозой ответного ядерного удара;

сдерживание нападения с применением превосходящих неядерных сил и вооружений противника;

¹ Помимо ДНЯО с 1963 г. было подписано несколько договоров о запрещении ядерных испытаний, кульминацией которых стал Договор о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний (ДВЗЯИ) в 1996 г. Был заключен ряд многосторонних договоров, запрещающих размещение ядерного оружия и других видов оружия массового уничтожения (ОМУ) в разных средах: Договор по космосу от 1967 г., Договор от 1971 г. о дне морей и океанов, договоры о 8 географических зонах, свободных от ядерного оружия.

² Кроме них Великобритания и Франция за несколько последних десятилетий тоже существенно сократили ядерные арсеналы односторонним образом.

сдерживание агрессии с использованием других видов оружия массового уничтожения;

сдерживание нападения с использованием ядерного оружия, других видов ОМУ или обычных вооружений против своих союзников.

В более общем плане государства всегда видят в ядерном оружии залог своего глобального или регионального статуса, политического влияния в мире.

Так же как Россия и США, ни одна ядерная держава не пожертвует этими интересами и не пойдет на ограничение, сокращение и тем более ликвидацию своих ядерных вооружений, исходя из общих благих побуждений, чтобы заслужить одобрение мировой общественности или под влиянием резонансов морального и юридического порядка¹.

Государства могут согласиться на физическое ограничение своих ядерных вооружений лишь на вполне конкретных условиях, о чем свидетельствует полувековой опыт успешных переговоров СССР/России и США.

Во-первых, это расчет на то, что в результате соглашения их стратегическое положение будет более благоприятным, нежели без него.

Во-вторых, что соглашение не легализует их отставание (и преимущество другой стороны) по тем или иным вооружениям, являющимся предметом договора.

Остается лишь удивляться, что ни Москва, ни Вашингтон до сих пор не осознали эти простые правила (которым они сами следуют в течение полувека) и не дали себе труда предложить что-то подобное другим ядерным государствам.

Первое условие предполагает наличие вполне определенных стратегических отношений сторон (например, отношений взаимного ядерного сдерживания). Тогда одно государство может пойти на ограничение своего ЯО в обмен на его ограничение другой страной с итоговым выигрышем для обоюдной безопасности.

¹ В истории ядерного разоружения есть лишь несколько особых исключений из этого правила. В 1992 г. ЮАР отказалась от ядерного оружия в контексте прихода к власти черного большинства. В те же годы Украина, Белоруссия и Казахстан согласились на вывод ЯО бывшего СССР со своей территории под сильным давлением России и Запада и в качестве условия зарубежного признания и предоставления гарантий их государственной независимости, суверенитета и территориальной целостности.

Второе условие предполагает примерное равенство сторон по вооружениям, избранным в качестве предмета переговоров, с тем чтобы взаимные уступки были сопоставимы, а итоговый баланс сил – равновесным.

Взаимное ядерное сдерживание по политическим или военно-техническим причинам отсутствует в отношениях США, Великобритании и Франции – с Израилем, Индией и Пакистаном. Таких отношений не просматривается и в стратегических взаимоотношениях России с КНР, Индией и КНДР, а с Израилем и Пакистаном вопрос не ясен. У Китая нет взаимодействия по модели ядерного сдерживания с Россией, Израилем, Пакистаном и КНДР, а с Британией и Францией ситуация пока туманна.

Великобритания и Франция имеют отношения ядерного сдерживания с Россией. Однако отсутствует второе условие для подобных соглашений – примерное равенство сторон. Великобритания и Франция не пойдут на договорно-правовую кодификацию военного превосходства России, а та не согласится сократить свои вооружения до уровня двух стран Европы ни в сумме, ни по отдельности.

Со своей стороны, Китай озабочен военной мощью США и потому не согласится ни на какие ограничения на взаимной основе с Британией и Францией. Однако ядерное превосходство США является препятствием для их переговоров с КНР.

Наконец, два негласных и непризнанных ядерных государства на противоположных окраинах Евразии: Израиль и КНДР – едва ли могут стать формальными участниками переговоров о разоружении с кем бы то ни было. У Израиля таких партнеров вообще нет, а если Иран попытается создать ядерное оружие, то ответом Израиля будут не переговоры, а массированный удар. КНДР развивает свои силы для сдерживания США, но для переговоров между ними тоже нет ни политических, ни стратегических условий.

Объективность военного анализа предполагает сравнение сопоставимых по классам ядерных вооружений государств. Так, если сложить все ядерные средства «тройки» (Британия, Франция и КНР) и средства «четверки» (Израиль, Индия, Пакистан, КНДР) по числу боезарядов¹, то с ними следует сравнивать не только стратегические ядерные силы (СЯС) России и США, но

¹ Из них лишь Великобритания и Франция открыто публикуют информацию о своих ядерных силах.

все их ядерные вооружения, включая до-стратегические вооружения (средней дальности и оперативно-тактические), причем как оперативно развернутые, так и на складском хранении в разных режимах технического состояния, в т.ч. подготовленных к демонтажу и утилизации (поскольку по имеющейся информации часть или даже все ядерные боезаряды «четверки» в мирное время содержатся в хранилищах).

Тогда соотношение ядерных боезарядов России, США, суммарной численности арсеналов «тройки» и «четверки» выглядит весьма асимметрично. У двух сверхдержав соответственно имеется 6500 и 6185 боезарядов, у трех других членов ДНЯО суммарно 790, а у четверки аутсайдеров 410 единиц (рис. 3) [8, с. 288].

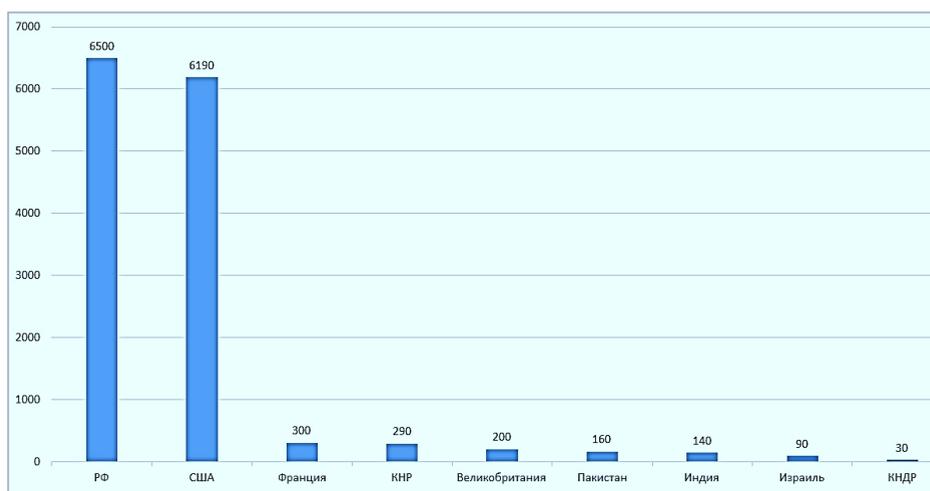


Рис. 3. Общее количество ядерных боеприпасов (включая размещенные на складах и в хранилищах)

Если вычленить вооружения «тройки» и «четверки», подпадающие под категорию Договора СНВ-3 по его правилам зачета, то у России и США имеется соответственно порядка 1430 и 1380 ядерных боеголовок, а у Великобритании, Франции и КНР в сумме около 600 единиц [9, с. 290, 302, 312, 320] (рис. 4). «Четверка» аутсайдеров вообще не имеет соответствующих развернутых вооружений.

Если сюда прибавить системы, подпадающие под Договор РСМД от 1987 г., то дополнительно можно было бы приплюсовать порядка 400 ракет «тройки» и «четверки» – до суммарного уровня примерно в 1000 единиц. Но

самое главное – нет никаких военных или политических резонов для объединения третьих ядерных государств в такие условные группы и ни одно из них не согласится на коллективный зачет, как на это не пошли бы Россия и США.

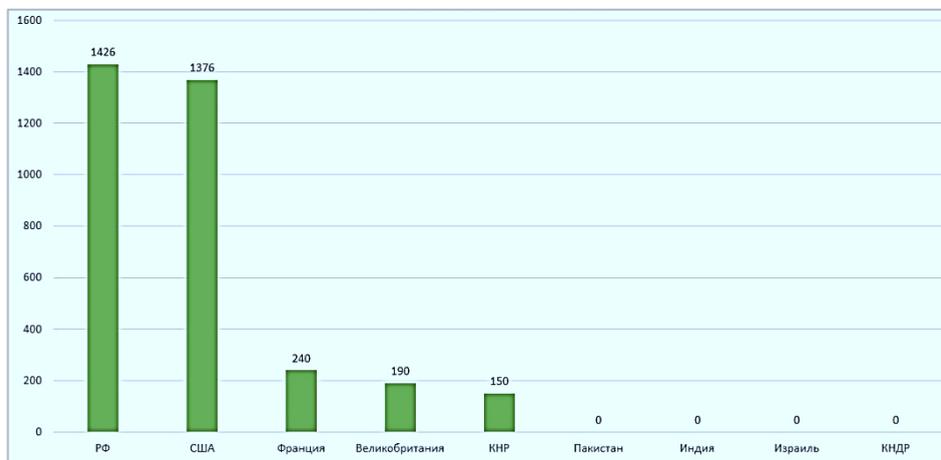


Рис. 4. Количество ядерных боеприпасов на стратегических носителях (по правилам зачета СНВ-3)

Основываясь на реальных военно-стратегических отношениях ядерных государств, единственный гипотетически возможный вариант – это не общий «оркестр» многостороннего разоружения, а несколько форумов двустороннего формата: Великобритания/Франция – Россия, США – КНР, Индия – Пакистан.

Европейские державы. Все прошлые попытки СССР приплюсовать силы европейских стран к СЯС США и ограничить их единым потолком были отвергнуты Западом¹. Отдельным переговорам России с двумя европейскими странами мешает огромная асимметрия СЯС сторон. Согласие Великобритании и Франции хотя бы на некоторые меры доверия, транспарентности, инспекционной деятельности из «меню» Договора СНВ-3 имело бы положительное значение как прецедент для других стран, прежде всего – Китая.

Фактически такие меры подтверждали бы верность официальной информации об английских и французских силах и программах их сокращения

¹ Первая такая попытка была предпринята в рамках Соглашения ОСВ-1 от 1972 г., затем – на переговорах об ОСВ-2 в конце 1970-х годов и в Договоре РСМД от 1987 г.

и модернизации. Но две европейские державы едва ли согласятся трактовать это как юридически обязывающее ограничение своих ядерных вооружений. А Россия едва ли возьмет на себя такие же меры доверия в контексте отношений с этими странами за рамками Договора СНВ-3 с США (что наверняка потребовали бы Лондон и Париж).

Только сильное давление со стороны США и союзников по НАТО и ЕС могло бы побудить две европейские державы принять такой подход. Стимулом для США и других стран могло бы стать согласие России на переговоры по тактическому ядерному оружию и по возрождению режима ДОВСЕ.

Южная Азия. Наличие отношений взаимного ядерного сдерживания и примерное равенство и однотипность сил Индии и Пакистана по ядерным носителям и боезарядам определяют уникальность ситуации в регионе. Помимо отношений России и США, это единственный случай, когда есть стратегические и технические предпосылки для классических соглашений об ограничении ядерных вооружений.

Препятствия имеют политический характер (территориальный спор, терроризм), а в военном отношении – индийское превосходство в силах общего назначения, высокоточных обычных средствах и по системе ПРО. Со стороны Индии главная преграда в том, что ее ядерные силы преимущественно предназначены для сдерживания превосходящего ядерного потенциала КНР, а пакистанские средства расцениваются лишь как «придаток» к китайским. Поэтому ограничение китайских ядерных вооружений, скажем, путем соглашения с США, облегчило бы переговоры Индии и Пакистана.

Китай. Реально первое условие для переговоров США и КНР присутствует – между ними существуют отношения взаимного ядерного сдерживания, то есть имеется почва для договорного обмена уступками. Но второго условия нет: стратегический баланс крайне асимметричен: у США есть превосходство по стратегическим ядерным силам (СЯС) и крылатым ракетам средней дальности (КРМБ) морского базирования¹, а у Китая отстает по СЯС и превосходит по ракетам средней и меньшей дальности (РСМД) наземного базирования. Ограничение или ликвидация наземных РСМД было бы односторонним и неприемлемым для Китая, а включение в договор

¹ Речь идет о крылатых ракетах морского базирования (КРМБ) типа «Томахок» на кораблях и многоцелевых подводных лодках.

морских крылатых ракет США натолкнулось бы на большие трудности засчета и верификации¹.

Тем не менее теоретически трехсторонний формат возможен. Например, Китай, США и Россия могли бы заключить интегрированный договор СНВ/РСМД. Такой договор мог бы установить для трех сторон равный потолок (скажем, в 1400–1500 боезарядов), но в отличие от ДСНВ-3, в него нужно было бы включить не только наземные, морские стратегические ракеты и тяжелые бомбардировщики, но также наземные ракеты средней и меньшей дальности (свыше 500 км) [10].

Тогда Китай будет иметь право наращивать свои стратегические силы (ныне около 140 единиц по носителям и боезарядам), параллельно сокращая соответствующее количество ракет средней дальности, которые так беспокоят США. А две ядерные сверхдержавы могли бы по своему усмотрению развертывать ракеты средней и меньшей дальности, но за счет соответственного сокращения своих стратегических вооружений.

От представленного варианта договора КНР получила бы равный с двумя сверхдержавами стратегический статус и признание ими (пусть по умолчанию) права Китая на паритет и стабильное взаимное сдерживание. Не менее важно, что КНР выиграла бы от ограничения наступательных систем стратегической и средней дальности США, создающих для Китая угрозу разоружающего удара. Со своей стороны, Россия и США получили бы гарантии предсказуемости наращивания китайских вооружений стратегического назначения и средней дальности.

Правда, признание права КНР иметь равное с США и Россией суммарное количество вооружений стратегической и средней дальности, видимо, не получит поддержки в Вашингтоне и Москве. Но и без договора Китай может за десяток лет сравняться с двумя сверхдержавами по СЯС, если примет такое политическое решение.

Израиль и Северная Корея. Если ядерные средства двух государств когда-то станут предметом соглашений, то скорее всего в рамках решения региональных проблем безопасности, ограничения обычных вооруженных

¹ В силу мобильности флотов Китай потребовал бы глобального ограничения ракет США, а контроль был бы затруднен, поскольку на кораблях такие ракеты размещаются в пусковых установках Mk-41 наряду с ракетами ПРО/ПВО, а на подводных лодках могут запускаться из торпедных аппаратов.

сил, урегулирования политических, экономических, территориальных и внутренних вопросов. Это предполагает региональный формат и контекст укрепления режимов ДНЯО и контроля над ракетными технологиями (РКРТ), а не традиционную модель соглашений об ограничении ядерных вооружений.

Главный вывод из приведенного анализа состоит в том, что расширение формата контроля над ядерным оружием – дело трудное, но гипотетически осуществимое. Однако приверженцам перехода к многостороннему ядерному разоружению (в прошлом в Москве, а теперь в Вашингтоне) нужно осознать, что он предполагает не только и не столько пересмотр нынешних позиций третьих стран, сколько гораздо большие уступки и жертвы со стороны двух ядерных сверхдержав как в военно-стратегическом, так и в политическом отношениях.

Если цена перехода к многостороннему формату покажется сегодня слишком высокой, то процесс следует продолжать в двустороннем формате. Для него накопилось много неотложных задач, решение которых жизненно важно для безопасности России, США и остального мира, как и для сохранения перспективы перестройки на многосторонний контроль над вооружениями в более отдаленном будущем.

4. Дестабилизирующие факторы – военно-технические инновации

Другой ряд причин стратегической дестабилизации связан с развитием военных технологий и в первую очередь – высокоточных ударных систем большой дальности в обычном оснащении. Они создают опасность нападения с применением высокоточных обычных систем оружия против ядерных сил друг друга.

Эффект «переплетения» ЯО и высокоточных обычных вооружений, в том числе новейших гиперзвуковых ракетно-планирующих, прямоточных и аэробаллистических систем, – это важнейший дестабилизирующий фактор современной стратегической обстановки. Например, это крылатые ракеты морского базирования (КРМБ) США типа «Томахок» (BGM-109) и воздушного базирования (AGM-84, AGM-158B JASSM-ER, AGM-183A, X-51). Россия наращивает арсенал крылатых ракет в неядерном оснащении: морские ракеты типа «Калибр» ЗМ-14, авиационные ракеты типа Х-55СМ, Х-555 и Х-101, «Кинжал», наземные крылатые ракеты типа 9М728 «Искандер» [11].

Именно этот фактор способен в случае вооруженного столкновения повлечь неуправляемую эскалацию конфликта.

Указанная опасность тем более велика, что расширяется развертывание носителей двойного назначения – с ядерным и обычным боезарядом. Это объяснимо с точки зрения сокращения расходов и технической оптимизации платформ, пусковых установок и других характеристик вооружений. Однако в случае их применения характер удара – ядерный или неядерный – нельзя будет определить до момента подрыва боевой части носителя. Это относится к КРМБ «Калибр» РФ и «Томахок» США, авиационным крылатым ракетам типа Х-101/102 РФ и AGM-158В США, а также к возможным новым ракетам наземного базирования средней дальности США в случае денонсации Договора РСМД: Precision Strike Missile (PrSM), Ballistic missile with trajectory shaping vehicles (BMTSVs), Long Range Hypersonic Weapon (LRHW) [12].

Серьезный усугубляющий момент – растущая сложность и дефицит времени при оценке информации и принятии решений политическим и военным руководством государств, высокой автоматизацией и быстроедействием систем управления. Эта опасность усугубляется развитием средств агрессивного воздействия на информационно-управляющие системы, включая космическое оружие, методы и средства массовой информационной войны и прямых кибератак.

Распространенное мнение о растущей скорости новейших стратегических вооружений и, вследствие этого, о сокращении времени принятия решений военно-политическим руководством, представляется спорным. Подлётное время новейших гиперзвуковых планирующих ракет не меньше, чем у традиционных баллистических носителей сопоставимой дальности. Другое дело, что траектории и боевое оснащение первых непредсказуемы и их труднее сопровождать и перехватывать средствами ПРО и ПВО. Правда, при массированном ударе существующие баллистические носители так же неотразимы с использованием современных и прогнозируемых оборонительных систем.

Специфика новейших наступательных средств в том, что старт ракетно-планирующих средств, как и баллистических ракет, обнаруживается спутниками СПРН через 60–90 минут, но из-за более низкой траектории гиперзвуковых планеров (50–60 км) подтверждение нападения со стороны РЛС может прийти не через 10–15 минут после старта разгонных ступеней, а

всего за несколько минут до падения планирующих боевых частей [13]. Следуя концепции ответно-встречного удара, отдавать приказ об ответном запуске своих ракетных средств пришлось бы только по информации спутников СПРН, что чревато развязыванием ядерной войны из-за ложной тревоги (которые не раз случались в прошлом), выхода спутника из строя или кибердиверсии. Во всяком случае, эта угроза сохранится, пока не будут созданы космические инфракрасные системы сопровождения гиперзвуковых планирующих средств в верхних слоях атмосферы.

В гонке сокращения времени предупреждения о нападении и ускорения процесса принятия решений об ответных действиях второе обречено на поражение. При этом сокращение времени принятия решений государственного руководства за счет цифровизации и автоматизации информационно-управляющих систем, включения в них технологий искусственного интеллекта создает опасность фактического, если не формального, исключения высшего политического руководства из процесса выдачи санкции на ядерный удар: от получения информации о нападении до пуска своих ракет.

Отведение нескольких минут (или даже секунд, как сказал В. Путин [14]) на такое решение превращает государственного руководителя в «придаток» к автоматизированной системе оценки информации и выполнения решений, разработанной специалистами в мирное время, задолго до кризиса и неспособной предусмотреть все неожиданности развития реальных событий.

Как представляется, более рациональный ответ на проблему сокращения времени предупреждения о нападении – отказ от ускорения процесса принятия решения, повышение живучести высших звеньев системы управления и самих средств ответного удара, продуманная система делегирования полномочий на случай недееспособности высшего руководства, оптимизация критериев неприемлемого ущерба для противника.

Не менее угрожающий фактор нестабильности – это вероятность применения ядерного оружия на локальном или региональном уровне обычного конфликта в целях его «прекращения на приемлемых условиях» [15]. США вменяют России планирование ограниченного применения ЯО в рамках концепции «эскалации ради деэскалации» [16] и противопоставляет ей свои аналогичные концепции и системы ядерного оружия пониженной мощности [17].

Во времена холодной войны такое применение сдерживалось вероятностью эскалации к массированному обмену ударами. Теперь возникла стратегическая концепция достижения победы путем эффективного применения обычных и ядерных средств, не доводя конфликт до массированного обмена ядерными ударами и вопреки стабильному балансу стратегических вооружений, исключая возможность первого массированного разоружающего ядерного удара.

Все эти моменты должна учитывать обновленная версия содержания стратегической стабильности и основанные на ней переговоры об ограничении вооружений с целью устранить как прежние, так и новые стимулы для любого применения ядерного оружия.

5. Повестка дня контроля над вооружениями

Переговоры с США невозможны без твердой опоры в виде эффективного российского потенциала сдерживания в составе наступательных и оборонительных ядерных и неядерных сил, с акцентом на повышение живучести и боеготовности системы управления и ударных средств против ядерного и неядерного нападения.

Кроме того, следует иметь в виду, что возможности договорно-правовых методов в обуздании гонки вооружений не безграничны, что продемонстрировал и исторический опыт. Границы определяются сферой совпадения стратегических и политических интересов сторон и техническими возможностями верификации соглашений.

В прошлом не удалось ограничить тактическое ядерное оружие, космические вооружения, крылатые ракеты средней дальности морского базирования, точность и мощность ядерных боеголовок и пр. Тем не менее контроль над вооружениями способен косвенно влиять на стратегические и оперативные военные планы государств, например, охватывая дестабилизирующие системы обычного оружия.

Помимо традиционных МБР, БРПЛ, их ядерных боеголовок и тяжелых бомбардировщиков, это прежде всего относится к неядерным ракетам большой дальности (по критериям прошлых договоров ОСВ/СНВ). Вопрос можно решить путем их засчета по реальному оснащению бомбардировщиков в потолках на стратегические боезаряды следующего договора СНВ, включая любые (ядерные и обычные) ракеты воздушного базирования свыше определенной дальности (600 км).

Ограничения носителей и боезарядов должны также охватывать наземные ракетно-планирующие гиперзвуковые системы и межконтинентальные крылатые ракеты большой дальности (более 5500 км). То же относится к морским крылатым ракетам и ракетно-планирующим системам и глубоководным беспилотным ударным аппаратам большой дальности (выше 600 км).

Применительно к ядерному оружию для избирательного использования достижение соглашений является гораздо более трудной задачей. Но и она разрешима косвенным путем через включение в потолок на боезаряды ядерных авиабомб на стратегических бомбардировщиках (чего никогда не было раньше). Наземные баллистические, планирующие гиперзвуковые и крылатые ракеты средней дальности с боеголовками пониженной мощности и обычными боезарядами должны подпадать под ограничения нового варианта ДРСМД. При достижении будущих договоров по разведению и сокращению вооруженных сил общего назначения (по типу ДОВСЕ от 1990–1999 гг.) вновь откроется возможность ограничения тактического ядерного оружия.

Возможность запрета или ограничения космических вооружений пока не просматривается, но угрозу спутникам СПРН можно снизить запретом испытаний любых ударных противоспутниковых систем по реальным мишеням в космосе [18]. Следует также согласовать правила сближений космических аппаратов на орбите, чтобы исключить замаскированную отработку операций по уничтожению спутников вероятного противника.

Проблемы разработки и верификации запретов или ограничений систем кибервойны сейчас кажутся неразрешимыми. Пока можно надеяться, как минимум, на целенаправленный диалог России и США для заключения взаимного политически обязывающего отказа от кибератак на стратегические информационно-управляющие системы друг друга для предотвращения непреднамеренного обмена ядерными ударами. В этом смысле можно использовать опыт обязательств великих держав о ненацеливании ядерного оружия друг на друга, что нельзя проверить, но осуществляется на практике и имеет стабилизирующий эффект.

Ближайшая задача после продления Договора СНВ-3 – начало переговоров по СНВ-4. После глубокого сокращения ЯО России и США за последние 30 лет и без подключения третьих стран, для следующего договора главная задача – не существенное сокращение потолков на стратегические носители и боезаряды и не включение до-стратегических (тактических) ядерных

вооружений (как, видимо, будет предлагать администрация Байдена), а расширение охвата ограничений с целью поддержания стратегической стабильности в ее новой версии, соответствующей изменившимся военно-техническим и военно-политическим условиям. Параллельно желательно начать переговоры о регламентации, транспарентности и предсказуемости глобальных и региональных систем ПРО.

Одновременно стоит задача реализации предложенного Россией моратория на развертывание ракет средней дальности в Европе и их ограничение в Азии. Это, помимо всего прочего, поможет противодействовать концепциям ограниченной ядерной войны.

Вопросы ограничения космических вооружений, а также средств и методов кибервойны следует обсуждать на отдельных переговорных форумах.

При этом нужно иметь в виду, что без прогресса на магистральном пути контроля над вооружениями (СНВ/РСМД) в будущем не удастся найти способы ограничения инновационных военных технологий, как и перейти к многостороннему формату соглашений в этой сфере. В этом состоит непереносимое условие восстановления стратегической стабильности, регламентации и предсказуемости ядерного сдерживания, укрепления международной безопасности.

Литература

1. Совместное заявление относительно будущих переговоров по ядерным и космическим вооружениям и дальнейшему укреплению стратегической стабильности. Государственный визит Президента СССР М. С. Горбачева в Соединенные Штаты Америки, 30 мая — 4 июня 1990 года. Документы и материалы. М.: Политиздат, 1990. [Joint Statement on Future Negotiations on Nuclear and Space Arms and Further Enhancing Strategic Stability. State visit of USSR President M. Gorbachev to the USA, 30 May–4 June 1990. Documents and materials. M.: Politizdat, 1990 (In Russ.)] С. 197–199; Soviet-United States Joint Statement on Future Negotiations on Nuclear and Space Arms and Further Enhancing Strategic Stability. 01.06.1990. <https://bush41library.tamu.edu/archives/public-papers/1938>.

2. Дворкин В. Сокращение наступательных вооружений / Под ред. Арбатова А., Дворкина В. Полицентричный ядерный мир / Московский центр Карнеги. Политическая энциклопедия. М. – 2017. [Dvorkin V. Reduction of Offensive Weapons – Polycentric Nuclear World: Challenges and New Possibilities. Ed. by A. Arbatov, V. Dvorkin. Moscow: Carnegie Moscow Center. 2017. 222 p. (In Russ.)] С. 67–68; Приведенный анализ выполнен с учётом данных одного из исследований корпорации РЭНД ВВС США (Wilkening D. Strategic Stability Between the United States and Russia // Challenges in U.S. National Security Policy: A Festschrift Honoring Edward L. (Ted) Warner / Ed. by D. Ochmanek, M. Sulmeyer. Washington: RAND, 2014. P. 123–140.

http://www.rand.org/content/dam/rand/pubs/corporate_pubs/CP700/CP765/RAND_CP765.pdf.

3. Заседание дискуссионного клуба «Валдай». Владимир Путин в режиме видеоконференции принял участие в итоговой пленарной сессии XVII ежегодного заседания Международного дискуссионного клуба «Валдай». 22 октября, 2020. [Meeting of the Valdai Discussion Club. Vladimir Putin took part, via videoconference, in the final plenary session of the 17th Annual Meeting of the Valdai International Discussion Club. October 22, 2020]. <http://en.kremlin.ru/events/president/news/64261>

4. Creating the Conditions for Nuclear Disarmament (CCND) / Working paper submitted by the United States of America. <https://undocs.org/NPT/CONF.2020/PC.II/WP.30> (accessed 25.01.19); Speech by Ms Alice Guitton Permanent Representative of France to the Conference on Disarmament Head of the French Delegation (Geneva, 23 April 2018). <http://statements.unmeetings.org/media2/18559222/france-new1.pdf> (accessed 25.02.19); Караганов С., Сулов Д. Новое понимание и пути укрепления многосторонней стратегической стабильности / Доклад. Национальный Исследовательский Университет «Высшая Школа Экономики». При поддержке МИД России и Комитета по международным делам Государственной думы ФС РФ; при участии Совета по внешней и оборонной политике. Москва, 2019. [Karaganov S., Suslov D. New understanding and ways to strengthen multilateral strategic stability. Report. National Research University Higher School of Economics. With the support of the Russian Ministry of Foreign Affairs and the Committee on International Affairs of the State Duma of the Russian Federation; with the participation of the Council on Foreign and Defense Policy. Moscow. 2019 (In Russ.)] http://svop.ru/wp-content/uploads/2019/09/REPORT_Rus_1.pdf.

5. В.В. Путин встретился в г. Сарове с экспертами по глобальным угрозам национальной безопасности, укреплению обороноспособности и повышению боеготовности Вооружённых сил Российской Федерации. Оф. сайт Председателя Правительства РФ В. Путина. 24 февраля 2012 г. [V. Putin met in Sarov with experts on global threats to national security, strengthening of defense capability and increasing the operational readiness of the Armed Forces of the Russian Federation. Official website of Prime Minister of the Russian Federation V. Putin. February 20 2012. (In Russ.)]. <http://archive.premier.gov.ru/events/news/18248/>.

6. Пленарное заседание Восточного экономического форума. Президент России. 5 сен. 2019 г. [Plenary session of the Eastern Economic Forum. Kremlin. September 5, 2019]. <http://kremlin.ru/events/president/news/61451>

7. Ядерное оружие после холодной войны / Под редакцией Арбатова А. и Дворкина В. // Московский Центр Карнеги, Москва, 2008. [Nuclear weapons after the Cold war. Ed. by Arbatov A., Dvorkin V. Moscow: Carnegie Moscow Center. 2008 (In Russ.)].

8. SIPRI Yearbook 2019: World Armaments, Disarmament and International Security. 2019. Oxford: Oxford University Press.

9. SIPRI Yearbook 2019: World Armaments, Disarmament and International Security. 2019. Oxford: Oxford University Press.

10. Арбатов А. Китай и ограничение вооружений: не утопия, а трудный выбор / Полис. Политические исследования. 2020. № 4. [Arbatov A. China and arms limitations: not a utopia, but a difficult choice. Polis. Political studies. 2020. № 4. (In Russ.)] С. 36–54. <https://doi.org/10.17976/jpps/2020.04.04>.

11. Кетонов С. Обошли на гиперзвуке / Военно-промышленный курьер. No 35, 10-16 сентября 2019 г. [Ketonov S. Overtaking by hypersonic. *Voenno-promyshlennyi kur'er*. No 35. 10.09.2019 (In Russ.)], С. 9.
12. Pifer S. The Death of the INF Treaty has Given Birth to New Missile Possibilities. *The National Interest*. September 2019. P. 1–7.
13. Acton J. Silver Bullet? Asking the Right Questions about Conventional Prompt Global Strike. – Washington: Carnegie Endowment for International Peace, 2013. P. 33–63.
14. Заседание дискуссионного клуба «Валдай». Президент России, 18.10.2018. [Meeting of the Valdai Discussion Club. Kremlin. 18.10.2018]. <http://kremlin.ru/events/president/news/58848>.
15. Об Основах государственной политики Российской Федерации в области ядерного сдерживания. Указ Президента Российской Федерации. Москва, Кремль 2 июня 2020 г. No. 355. [Basic Principles of State Policy of the Russian Federation on Nuclear Deterrence. Order of the President of the Russian Federation. Moscow. Kremlin. 02.06.2020. No. 355 (In Russ.)]. <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/001202006020040?index=2&rangeSize=1>.
16. Актуальные задачи развития Вооруженных сил Российской Федерации. Красная звезда, 11.10.2003. [Crucial Tasks of the Development of the Armed Forces of the Russian Federation. *Krasnaya zvezda*, 11.10.2003 (In Russ.)]. http://old.redstar.ru/2003/10/11_10/3_01.html (accessed 02.02.2018).
17. Nuclear Posture Review. Office of the Secretary of Defense. February 2018, Washington, DC. <https://media.defense.gov/2018/Feb/02/2001872886/-1/-1/1/2018-NUCLEAR-POSTURE-REVIEW-FINAL-> (accessed 01.03.2018).
18. Арбатов А. Ускользящая материя (Предотвращение гонки вооружений в космическом пространстве) / *Мировая Экономика и Международные Отношения*. 2019, том 63, no.1 [Arbatov A. Elusive matter (The prevention of arms race in outer space). *World Economy and International Relations*. 2019, Vol 63, no. 1 (In Russ.)]. С. 5–17.

Ю.М. Батулин¹

КОГЕРЕНЦИЯ ФИЗИКОВ, СТАВШИХ ЯДРОМ СОВЕТСКОГО АТОМНОГО ПРОЕКТА²

20 августа 1945 года при Государственном комитете обороны (ГОКО) были созданы Спецкомитет и Первое главное управление при Совете народных комиссаров (СНК) СССР. С этого дня ведут отсчет атомной отрасли. В то же время День работника атомной промышленности (28 сентября) уводит нас в 1942 год, когда было издано распоряжение ГОКО № 2352 «Об организации работ по урану». Этот пример подтверждает определенную условность юбилейной даты, приблизительность, с которой часто отсчитываются исторические этапы.

Задача из будущего

Атомный проект традиционно приводят как самый яркий пример возможностей мобилизационной науки [1].

Термин «мобилизация» обозначает быстрое сосредоточивание под воздействием *извне* (по приказу), приведение в деятельное состояние для решения поставленной задачи. Издать приказ о мобилизации нетрудно. Однако как понять, кого именно мобилизовать, если требуется решить задачу, которая по силам лишь единицам физиков? Чтобы дать ответ на этот вопрос, надо посмотреть, что происходило в научном сообществе *до* приказа о мобилизации, до того, как государство поставило задачу создать атомную бомбу?

Для удобства будем использовать термин «когеренция» (от основы глагола *cohaereo* – *лат.* быть связанным, держаться вместе). Производное от этого глагола существительное – *coherentio* (*лат.* сцепление, внутренняя связь). Когерентность – это свойство, в то время как когеренция (несмотря на редкость употребления этого термина) – процесс, противоположный декогеренции – процессу нарушения, потери когерентности. Когеренция происходит не по приказу *извне*, как мобилизация, и этим она особенно интересна.

А.Н. Колмогоров (к слову – в 1941–1942 годах!) показал, что в турбулентности (а история описываемого времени особенно турбулентна)

¹ Главный научный сотрудник Института истории естествознания и техники им. С.И. Вавилова РАН, член-корреспондент РАН.

² По материалам доклада на заседании общего собрания ОИФН РАН.

образуются устойчивые когерентные структуры [2]. Это процесс когеренции – самоорганизации совокупности не связанных между собой частиц различной природы, которые вдруг начинают вести себя сходным образом.

В 1962 г. А.Н. Колмогоров обнаружил подобный характер спектров интенсивности колебаний гидродинамических потоков и экономических индикаторов [3]. Это означало, что законы вариаций экономических параметров и скорости турбулентных флуктуаций потоков воды не зависят от физических свойств ни частиц воды, ни частиц экономической среды.

Если мы попробуем распространить эту гидродинамическую аналогию на людей, рассматривая их как частицы социальной среды, то поймем, что процесс когеренции охватил и физиков, которым предстояло в будущем быть мобилизованными, чтобы осуществить атомный проект (когеренция ученых). Пример успешности атомного проекта говорит о том, что предварительно в сообществе ученых шли процессы отбора подходящего «материала» для решения будущей задачи.

Но как возникает когеренция в социальной системе?

Пути развития системы описываются траекториями в фазовом пространстве, и в каких-то его областях они скручиваются в особые точки. Работы математиков Шарля Брио (1817–1882) и Жан-Клода Буке (1819–1885), занимавшихся особыми точками и создавших, в частности, первую, еще несовершенную классификацию уравнений и их интегралов по характеру особых точек [4], подтолкнули Анри Пуанкаре в начале 1880-х годов к совершенно нетривиальной идее – общей постановке задачи качественного исследования дифференциального уравнения: если решить дифференциальное уравнение не всегда удастся, то не попробовать ли путь в обход: вместо сложной, а то и невыполнимой операции интегрирования получить сразу вид кривой, отражающей решение этого уравнения [5].

С тех пор качественная теория дифференциальных уравнений получила достаточное развитие, и стало понятно, что некоторые особые точки затягивают в себя множество возможных траекторий системы, определяемых разными начальными условиями. Происходит своего рода детерминация настоящего будущим, т.е. только предстоящим состоянием системы, которое еще не достигнуто, его еще нет, но будущее уже притягивает настоящее.

Существуют очень сложные структуры со многими степенями свободы, такие как государство. Если у государства как системы возникает потребность в создании того, чего не было (особая точка, своего рода пустота, дырка в структуре), то заполнить эту дырку (вакансию) будут стремиться элементы системы, обладающие определенными свойствами.

Если говорить о людях, то такими элементами оказываются специалисты, обладающие нужными знаниями. Часто такие вакансии оказываются аттрактором, то есть привлекающим активным центром потенциальных путей развития, способным вовлекать и организовывать. В этом смысле можно сказать, что аттракторы из будущего притягивают ход событий. Проблема завтрашнего дня манила ученых (есть вакансия – она должна быть заполнена и задача решена).

Трек ядра атома в историческом детекторе

Теперь следует бросить общий взгляд на траекторию, которая привела к созданию атомной бомбы.

Эмпирически установлено, что полный цикл технологических нововведений от идеи через научные разработки и инженерные решения к полномасштабному освоению занимал в XIX и XX веках 140 лет. Каждая фаза – по 35 лет.

Конечно, эта закономерность не осуществляется с точностью до года. Рассчитана полоса погрешности, которая составляет 9 лет (плюс/минус 4,5 года с каждой стороны от указанной точки на временной оси) [6]. Теоретически длительности фаз можно проверить, исходя из гипотезы Колмогорова 1962 года о подобном характере законов вариаций экономических индикаторов и скорости турбулентных флуктуаций водных потоков

$$\tau \approx L^{2/3},$$

где τ – период колебаний совокупности частиц среды с общим линейным размером L ; L – линейный размер среды (корень квадратный из совокупной площади стран, где в будущем может применяться атомная энергия), испытывающей колебания с периодом τ .

Опираясь на гипотезу А.Н. Колмогорова, мы можем рассчитать период самого низкочастотного процесса развития атомной энергетики, т.е. его длительность от первых идей до полномасштабного освоения атомной энергии (как военных приложений, так и применения «мирного атома») [7].

Если взять площадь суши Земли (140 млн км²), то отталкиваясь от известного длинного цикла Кондратьева (55 лет) экономических колебаний для США площадью 9 млн км², по формуле Колмогорова получим

$$\tau = 55 \times (140/9)^{1/3} \sim 140 \text{ лет.}$$

В качестве точки отсчета четвертой фазы (собственно, атомный проект) возьмем 1945 г. Последовательно отсчитывая от этой точки по 35 лет, получим следующую картину (рис.1).

Бегло охарактеризовав две первые фазы, сосредоточимся на третьей, которая и есть предмет нашего исследования. Начало 140-летнего периода можно отметить символическим хобби французского физика Антуана Сезара Беккереля, который не мог налюбоваться свечением вод Адриатического моря.

	±4,5 г.	±4,5 г.	±4,5 г.
Первые идеи	Научная разработка	Экспериментально-инженерная фаза	Полномасштабное промышл. освоение
1875	1910	<i>Когеренция</i>	1945 <i>Атомный проект</i>

Рис.1. Четыре фазы развития атомной отрасли

Символика связана с тем, что Антуан Сезар стал родоначальником династии, активно интересовавшейся светящимися веществами. Его сын, Александр Эдмон Беккерель, фотограф и коллекционер, собрал вместе с отцом большую коллекцию, в которой оказались и соединения урана. В середине XIX века Абель Ньепс де Сент Виктор, который, как и Александр Эдмон, занимался фотографией, заметил, что соединения урана вызывают почернение фоточувствительного материала, и предположил существование невидимых для глаз лучей, оказывающих влияние на стеклянные коллоидонные фотопластинки.

Он почти совершил открытие, но остановился в своих исследованиях. Решающий шаг – и в этом отмеченный символизм – сделал внук Антуана Сезара Беккереля. 1 марта 1896 года Антуан Анри Беккерель при помощи фотопластинки и урановой соли открыл явление радиоактивности.

С этого момента научные исследования радиоактивности резко ускорились.

Необходимо упомянуть следующие замечательные события, случившиеся до открытия Беккереля. В 1859 г. немецкий физик Юлиус Плюккер открыл катодные лучи, а его соотечественник Иоганн Гитторф в 1869 г. описал их свойства. В 1890 г. американский физик Артур Уиллис Гудспид и помогавший ему британский фотограф Уильям Дженнингс обнаружили «эффект вуали» на фотопластинках, которые они использовали для фотографирования искровых разрядов, но не сумели распознать в них знаменитые X-лучи, открытые в 1895 г. Вильгельмом Рентгеном и названные впоследствии его именем. В том же 1896 г. голландский физик Питер Зеeman открыл названный его именем эффект расщепления спектральных линий в магнитном поле. Но «язык атомов» – спектры – расшифровать тогда не удалось, хотя «репутация» атома как неделимой частицы и пошатнулась.

В 1897 г. английский физик Джозеф Дж. Томпсон, исследуя катодные лучи в газоразрядной трубке, установил, что они представляют собой поток частиц, более легких, чем атом. Так был открыт электрон.

В 1898 г. Мария Склодовская и Пьер Кюри выделили немного нового вещества, которое испускало альфа-частицы. Они назвали его полонием. В том же году они открыли новый элемент радий [8].

Эффектный финал второй фазы для краткости опишем табл. 1.

Таблица 1

Выдающиеся открытия второй фазы развития атомной отрасли

Год	Автор(ы)	Открытие	Примечание
1895	В. Рентген	Рентгеновские лучи	Нобелевская премия по физике 1901 г.
1896	П.Зееман	Расщепление спектральных линий	Нобелевская премия по физике 1902 г.
1896	А.А. Беккерель	Радиоактивность	Нобелевская премия по физике (½) 1903 г.
1897	Дж.Дж. Томпсон	Открытие электрона	Нобелевская премия по физике 1906 г.
1898	М. Склодовская-Кюри П. Кюри	Открытие полония и радия. Получение металлического радия	Нобелевские премии (по ¼) по физике 1903 г. М. Склодовская – нобелевская премия по химии 1911 г.
1899	Э.Резерфорд	α -лучи β -лучи	Э.Резерфорд – ученик Дж. Томпсона
1899	М. Кюри П. Кюри	Наведенная радиоактивность	Вывод, что радиоактивность – свойство атомов многих элементов
1900	М. Кюри	Превращения атомов	Атомы – неизменные структуры
1903	Дж.Дж. Томпсон	Модель атома	«Пудинговая модель»
1903	Э. Резерфорд Ф. Содди	Закон радиоактивного распада	Предсказание трансурановых элементов
1903	П. Кюри А. Лаборд	Гипотеза о выделении энергии атома	«Величина энергии, участвующей в превращении атомов, очень велика»
1904	Э. Резерфорд	Бейкеровская лекция	Теория радиоактивных превращений, Нобелевская премия по химии 1908 г.
1905	А. Эйнштейн	Масса тела – мера энергии	Ввел понятие энергии покоя тела (атомной энергии)
1908	Х. Гейгер Э. Резерфорд	Регистрация заряженных частиц	В 1908 г. Х.Гейгер также измерил заряд электрона

Трудное проникновение в ядро

Мы, наконец, подошли к третьей фазе.

В 1910 году Владимир Иванович Вернадский выступил в Академии наук о деле государственной важности – поиске запасов радия. Доклад оказался убедительным и в следующем году была организована радиевая лаборатория Академии наук, а затем и Радиевая экспедиция. В 1912 году с прицелом на промышленное производство радия был создан пробный Радиевый завод, находящийся около пристани Тихие Горы на реке Каме. Он проработал 13 лет, давая до полутора граммов радия в год.

В 1911 году М. Склодовская-Кюри награждена еще одной Нобелевской премией, теперь уже по химии, за открытие и изучение радия.

В 1911 году английский физик новозеландского происхождения Эрнест Резерфорд предложил планетарную модель строения атома и доказал, что почти вся масса атома сосредоточена в его ядре. Планетарная модель впоследствии оказалась неверной, но тогда она вполне удовлетворяла физиков. Им стало ясно, что надо заниматься проблемой ядра. Вместо неделимого атома появился новый глубинный уровень неделимости – ядро. И скрытая в атоме энергия теперь оказалась упрятанной в ядре.

В 1913 году датский физик Нильс Бор создал свою модель атома, включив в модель Резерфорда квантовые идеи (Нобелевская премия по физике 1922 года). Он фактически ввел дискретные уровни энергии. В 1916 г. теория Бора была усовершенствована немецким физиком-теоретиком Арнольдом Зоммерфельдом.

В 1919 г. Резерфорд осуществил первую искусственную ядерную реакцию, а в 1920 г. во второй Бейкеровской лекции «Ядерное строение атомов» предсказал существование нейтрона, его роль в ядерной структуре и условия возникновения. От экспериментов Резерфорда 1921–1925 гг. и их теоретического истолкования берет свое начало концепция ядерных сил и сильных взаимодействий.

В 1920 г. научный сотрудник на кафедре А.Ф. Иоффе в Петроградском политехническом институте П.Л. Капица и завлаб ЛФТИ Н.Н. Семенов предложили метод определения магнитных моментов атомов в атомном пучке.

В 1922 году академик В.И. Вернадский пишет ряд записок о срочной необходимости организации Радиевого института при Академии наук [9], и благодаря его усилиям в Советском Союзе Радиевый институт, наконец, создается. В.И. Вернадский становится его директором, а заместителем назначает В.Г. Хлопина, своего друга и помощника, старшего химика Минералогического и Геологического музея Академии наук.

4 февраля 1922 г. проходит первое публичное заседание Радиевого института в помещении Академии наук, на котором В.Г. Хлопин продемонстрировал собраным за предыдущие годы образцы и рассказал о работе своих сотрудников.

С начала 1930-х годов события стали развиваться особенно быстро. Академик А.Ф. Иоффе организовал в ленинградском Физтехе лабораторию по изучению атомного ядра, возглавил которую молодой И.В. Курчатов.

В 1932 г. В.И. Вернадский, говоря о срочной необходимости реорганизации Радиевого института и превращения его в «научно мощную, отвечающую современному уровню науки научно-исследовательскую организацию всесоюзного значения», аргументировал это такими словами: «Атомная энергия, которая изучается в радиевых институтах, – есть огромная действенная энергия, самый мощный источник энергии, научно ныне известный. Это та сила, которая будет определять жизнь человеческих обществ в ближайшем будущем, по-видимому, уже для ближайшего поколения. Очевидно, этой энергией необходимо овладеть возможно скорее. И бесспорно ясно, что человечество к этому охвату уже подошло.... Сейчас идет интенсивная работа в области выяснения строения ядра атомов. Это проблема, на решение которой сейчас направляется мысль физиков всего мира. В составе Радиевого института есть сейчас талантливые научные силы, но таких немного. Наш Союз столько потерял талантливой, богато одаренной для научной работы молодежи, что необходимо вообще принять срочные меры для уменьшения этого несчастья и для представления настоящих условий работы оставшимся.... Таких людей всегда немного, и создавать их мы не умеем. Одаренная для научной работы молодежь есть величайшая сила и драгоценное достояние человеческого общества, в котором она живет.... Имея таких людей в Радиевом институте для этой важнейшей научной проблемы, надо дать свободный простор их работе» [10]. Государство не отреагировало на призыв В.И. Вернадского, но задача захватила физиков, в том числе молодых. Будущее начало притягивать настоящее. Было ясно, что «здесь охватывается энергия будущего.... Будущее принадлежит тому, кто не будет последним в этой работе» [11].

В том же, 1932 году английский физик Джеймс Чедвик открыл нейтрон – массивную частицу с нулевым электрическим зарядом, предсказанную Резерфордом. Британские ученые впервые смогли расщепить атом в лаборатории.

Обнаружение нейтрона разрушило последние преграды на пути к овладению атомной энергией.

Спустя несколько месяцев после открытия Чедвика немецкий физик Вернер Гейзенберг и немного раньше него (!) советский физик Д.Н. Иваненко предложили свои протонно-нейтронные модели ядра.

Можно сказать, что с этого момента советские физики оседлали волну мирового уровня. И с этой точки начался этап когеренции отечественных атомщиков, потому что они работали в относительной изоляции от западных физиков, имея, правда, возможности читать новейшую научную литературу¹.

В 1933 г. Лео Сциллард, глядя на переключение светофора на Рассел-сквер в Лондоне (горит один цвет, а два других погашены), вдруг понял, что если найти элемент, который расщепляется на два нейтрона, то такой элемент, будучи собран в достаточно большой массе, сможет поддерживать цепную реакцию. В 1934 г. его гипотезу подтвердил Энрико Ферми (Нобелевская премия по физике 1938 г.). В 1938 г. был взят главный рубеж, когда был открыт новый вид радиоактивности: деление нейтроном ядра урана на два осколка. В 1939 г. австрийский физик и радиохимик Лиза Мейтнер, работавшая со своим племянником Отто Фришем, высказала гениальную гипотезу. Сравнив ядро с каплей жидкости, они предположили, что внедрившийся нейтрон заставлял эту «каплю» колебаться и доводил ее до разрыва на две части, как деление клетки (отсюда биологическая аналогия – «деление ядра»).

В 1939 г. в США покинувший Италию Э. Ферми активно включился в нейтронные исследования, чему способствовало известие об открытии в декабре 1938 г. Отто Ганом (Нобелевская премия по химии 1944 года) и Фрицем Штрассманом деления ядер урана, которое Ферми первым вызвал в своих экспериментах 1934 г., но не понял, что это деление – единственная ошибка великого физика, которую он тяжело переживал. Уже 25 января 1939 г. он с сотрудниками воспроизвел эффект деления урана, сразу за аналогичными экспериментами (18 января) во Франции Федерико Жолио-Кюри и Ирен Жолио-Кюри (оба – Нобелевская премия по химии 1935 г.) и английского физика Отто Фриша в Копенгагене.

Таким образом, несколько групп физиков, работая независимо друг от друга и различными методами, пришли к одному и тому же выводу –

¹ В.Е. Фортов вспоминал, как во время обсуждения какого-то научного вопроса Я.Б. Зельдович сказал ему: «Вы не учли такой-то механизм». – «А где об этом можно прочитать?» – «В работе Годеса. Журнал «Physical Review» за 1942 год». Фортов решил, что этот журнал нигде не достать. Во время войны было не до научных журналов. И все же пошел в библиотеку. Все номера за 1942 год стояли на полке. Во время войны государство тратило деньги на то, чтобы ученые могли следить за мировыми научными достижениями и нормально работать [12].

о возможности в уране цепной ядерной реакции деления [8]. В США именно Ферми оказался лидером, выдвинувшим большую часть идей, связанных с осуществлением цепной ядерной реакции деления, необходимой для создания атомной бомбы. И уже в январе Лео Сциллард и Роберт Оппенгеймер поняли, что атомная бомба возможна. Сциллард предлагал тут же засекретить полученные данные от немцев.

К концу 1939 г. наметились два подхода к созданию бомбы. Первый заключался в необходимости выделения из природного урана редкого изотопа ^{235}U , ответственного за процесс деления урана медленными нейтронами. При этом, чтобы получить изотоп ^{235}U необходимой чистоты в требуемых для бомбы количествах, можно было использовать различные методы: электромагнитный, газодиффузионный или метод, детально изученный Ю.Б. Харитоновым в 1937 г. – разделение ^{235}U и ^{238}U в газовой фазе в высокоскоростной центрифуге. Во втором подходе исследования сосредоточились на альтернативном ^{235}U расщепляющем элементе ^{239}Pu – плутонии-239. Следовательно, к бомбе вели два направления – разделение изотопов (получение ^{235}U) и наработка с помощью ядерного реактора ^{239}Pu .

С 1933 г. учёные в Советском Союзе регулярно проводили конференции по атомному ядру и использованию внутриатомной энергии, на которых, собственно, и был запущен механизм когеренции.

24–30 сентября в Ленинграде состоялась Первая Всесоюзная конференция по ядерной физике, в которой приняли участие А.Ф.Иоффе, И.Е. Тамм, Ю.Б. Харитон, Л.А. Арцимович, А.И. Лейпунский. Среди приглашенных иностранных физиков были Ф. Жолио-Кюри, Поль Дирак и др.

В 1938 г. для координации работ в области ядерной физики в АН СССР была образована Комиссия по атомному ядру под председательством С.И. Вавилова. В состав комиссии вошли А.Ф. Иоффе, А.И. Алиханов, И.В. Курчатов, Г.М. Франк, В.И. Векслер, А.И. Шпетной.

В марте 1938 г. группа сотрудников ЛФТИ направила В.М. Молотову письмо о необходимости экспериментальных работ по атомному ядру, однако, заручиться правительственной поддержкой им не удалось.

С тем же успехом в 1940 г. академики В.И. Вернадский, А.Е. Ферсман, В.Г. Хлопин пишут письмо заместителю председателя Совнаркома Н.А. Булганину, в котором просили форсировать работы по использованию внутриатомной энергии в Советском Союзе, чтобы не отстать от зарубежных стран: «Работы по физике атомного ядра привели в последнее время к открытию деления атомов урана под действием нейтронов, при котором освобождается огромное количество внутриатомной энергии.... Эти работы

ставят на очередь вопрос о возможности технического использования атомной энергии... Важность этого вопроса вполне осознается за границей, и, по поступающим оттуда сведениям, в Соединенных Штатах Америки и Германии лихорадочно ведутся работы, стремящиеся разрешить этот вопрос, и на эти работы ассигнуются крупные средства» [13].

Летом 1940 г. Президиум АН СССР образовал Комиссию по проблемам урана во главе с академиком В.Г. Хлопиным для составления плана работ по использованию внутриатомной энергии урана. В неё наряду с академиками С.И. Вавиловым, В.И.Вернадским, А.Ф. Иоффе, А.Е. Ферсманом вошли молодые физики И.В. Курчатов, Ю.Б.Харитон, сыгравшие вскоре главную роль в разработке и реализации Атомного проекта.

Надо сказать, что И.В. Курчатов считал планы Комиссии, направленные на последовательную разработку методов разделения изотопов, проведение работ по достижению управляемой цепной реакции и в конечном итоге строительство ядерного реактора, слишком консервативными и настаивал на скорейшем строительстве ядерного реактора [14].

Будущие участники Атомного проекта, работавшие в академических институтах над проблемами радиоактивности, вели совместные исследования задолго до начала проекта. Причём один и тот же учёный нередко одновременно работал в разных институтах: среди них были ученики Н.Н. Семёнова – Я.Б. Зельдович и Ю.Б.Харитон, занимавшиеся теорией детонации, важной для создания атомного и термоядерного оружия.

В когеренции будущих участников Атомного проекта особую роль сыграли теоретические исследования в ЛФТИ, которыми руководил член-корреспондент Я.И. Френкель. В них участвовали все крупнейшие сторонники квантовой физики, в том числе Л.Д. Ландау и И.Е. Тамм.

В 1940 году Я.Б. Зельдовичем и Ю.Б. Харитоном были сделаны оценки по кинетике механизма цепной реакции. Эти два ученых сыграли выдающуюся роль в создании советской атомной бомбы.

Н.Н. Семенов, прочитав их работы, написал письмо о бомбе в ЦК ВКП(б). Он рассказывал своему ученику В.Е. Фортову, что «его вызвали в Москву, и он просидел две недели у телефона, потому что Кафтанов, который в то время в ЦК курировал науку и образование, сказал: «Тебе будет звонить Молотов по поводу этой бумаги». Тем не менее бумага хода не получила. Семенов прождал две недели. Молотов так и не позвонил.

И если мы не первыми сделали бомбу, то никак не потому, что ученые проглядели. Ученые как раз предлагали. Если бы в то время руководство нашло ресурсы, проявило мудрость и волю и оценило бы это предложение

Академии наук, то, конечно, история могла пойти совсем по-другому. А мы вполне могли сделать атомную бомбу раньше, чем наши в то время союзники» [12].

Нужно заметить, что у нас в стране заниматься несанкционированными задачами, такими как ядерная проблема, было не просто. Николай Николаевич Семенов рассказывал, что ему даже сделали выговор по партийной линии за то, что он поддерживал атомные разработки, а не занимался должным образом работами по горению ракетных топлив [12, с. 42]. Я.Б. Зельдович и Ю.Б. Харитон были вынуждены в факультативном режиме, фактически во внерабочее время, вести работы по ядру и сумели сделать ставшие абсолютно классическими расчеты механизма цепной реакции, критической массы, и предсказания, какие режимы должны быть для перевода в критическое состояние. На ежегодной Всесоюзной конференции по ядерной физике в ноябре 1939 г. в Харькове они доложили свое заключение, что замедлителями нейтронов могут быть углерод (графит) и тяжелая вода (${}^2\text{H}_2\text{O}$ или D_2O)¹.

В 1939 г. сотрудники ленинградского Физтеха Г.Н. Флеров и Л.В. Русинов измерили число вторичных нейтронов в реакции, а в 1940 г. Г.Н. Флеров и К.А. Петржак совершили открытие резерфордовского уровня – спонтанное деление ядра. Также в 1940 г. сотрудник эвакуированного в Уфу Института физики и математики АН УССР Фридрих Ланге (эмигрировавший в 1935 г. в СССР немецкий физик) и в 1941 г. сотрудники Уральского физико-технического института В.С. Шпинель и В.А. Маслов подали в Отдел изобретательства Наркомата обороны заявку на «устройство подобное атомной бомбе», а в 1941 г. – заявки на изобретение методов наработки ${}^{235}\text{U}$ «Способ приготовления урановой смеси, обогащенной ураном с массовым числом 235. Многомерная центрифуга» и «Термоциркуляционная центрифуга. Центробежный способ разделения изотопов урана».

Словом, к началу Великой Отечественной войны советские физики и химики, несмотря на отсутствие внимания со стороны государства и нехватку финансовых средств, все же были подготовлены к проекту по созданию атомного оружия. И важным было то, что все они знали друг друга если не лично, то по публикациям.

Таким образом, процесс когеренции физиков успешно завершился, и к тому времени, когда 20 августа 1945 был создан Спецкомитет при ГОКО и

¹ Тяжелая (тяжеловодородная) вода вместо двух атомов легкого изотопа водорода (протия) содержит два атома тяжелого изотопа водорода (дейтерия). Обнаружена в 1932 г. Гарольдом Юри (Нобелевская премия по химии 1934 года).

Первое главное управление при СНК СССР, уже появилось множество специалистов по ядерной теме высочайшего уровня. Было из кого выбирать. Если бы им поступила команда вовремя, тогда атомный проект начался бы на пять (1) лет раньше (позже, чем в Германии, но раньше, чем в США). Кстати, в 1940 г. внезапно в научных журналах прекратились публикации по ядерной физике. Тогда и настал момент для атомного проекта, будь этот сигнал правильно прочитан советским правительством.

Петр Леонидович Капица считает, что если бы ученым не мешали, то бомбу советские специалисты создали бы самостоятельно и раньше американцев. Он пишет в письме Сталину в 1952 году: «Мне вспоминается то исключительно малое внимание, которым у нас в Союзе, до войны, пользовалась ядерная физика. Сколько тогда времени и сил затратили Иоффе и Алиханов, чтобы построить первый у нас в Союзе циклотрон, и это тогда, когда в Америке их было уже несколько. Известно, что без циклотрона серьезные исследования в ядерной физике невозможны. Тогда опять же ошибочно оценивали эти работы, как имеющие чисто академический интерес.... Но насколько было бы лучше, если бы мы были ведущими в области ядерной физики и раньше других имели атомную бомбу. Я вполне допускаю, что наши ученые, работающие в ядерной физике по своим способностям и знаниям, если бы их не отвлекали и им смело помогали, могли бы решить проблему атомной бомбы вполне самостоятельно и раньше других» [15].

После нападения Германии научные исследования по урановой проблеме в СССР были прекращены как слишком длительные и дорогостоящие. Большинство ученых, входивших в состав Урановой комиссии, были переброшены на оперативные оборонные работы.

Проживавший в США сын В.И. Вернадского прислал отцу статью об американских атомных разработках и на полях приписал: «Папа, не опоздайте».

13 марта 1943 г. В.И. Вернадский пишет записку о необходимости возобновления работ урановой комиссии: «Я считаю необходимым немедленно восстановить деятельность Урановой комиссии, имея в виду как использование урана для военных нужд, так и необходимость быстрой реконструкции последствий разрушений от гитлеровских варваров, произведенных в нашей стране. Для этого необходимо ввести в жизнь источники новой мощной энергии... Из того, что доходит до меня из иностранной литературы, я вижу косвенные указания на то, что мысль в этом направлении идет как у наших союзников, так и у наших врагов, и, очевидно,

в этом направлении идут искания» [16]. Президент АН СССР В.Л. Комаров передал записку В.И. Вернадского в СНК СССР.

Критически важные заслуги разведки

Руководство государства, построенного так, что верили более всего спецслужбам, а не ученым, получило, наконец, информацию разведки, которая подключилась к проблеме на этапе завершения процесса когеренции ядерных физиков, когда в 1940 году начальник научно-технического отдела внешней разведки НКВД Л.Р. Квасников, в то время единственный в разведке человек знакомый с основами ядерной физики, по своей инициативе дал ориентировку в резидентуры в странах, где возможны подобные исследования, по сбору информации о работах, связанных с использованием атомной энергии в военных целях.

Информация начала поступать с конца сентября 1941 года. Лондонским резидентом А.В. Горским (оперативный псевдоним «Вадим») были получены разведанные о возможности создания урановой бомбы в пределах двух лет и о подготовленном к срочному осуществлению проекте строительства газодиффузионного завода, но отмечались также и трудности. Это были первые данные разведки НКВД от Д. Маклина («Лист»), сотрудника МИД Великобритании, по атомной проблеме.

Данные были доложены Л.П. Берии, который отверг их как дезинформацию, нацеленную на отвлечение людских и материальных ресурсов. Но он направил донесение в 4-й спецотдел НКВД, представлявший собой крупный научно-исследовательский центр. 10 октября на материал разведки появился отзыв, написанный, судя по научной аргументации и терминологии физиком, уклончивый по выводам: создание бомбы возможно, но не скоро [17]. Документы лежали не оцененные еще около двух месяцев.

Потом был сделан запрос в Разведупр Генштаба Красной армии, есть ли у них сведения об исследованиях за рубежом по урановой проблеме, и если есть, выслать их в НКВД на имя наркома Л.П. Берии.

Такие материалы в военной разведке были. Еще 8 августа 1941 г. военная разведка получила первые сведения о работе британских ядерных физиков над атомной бомбой от Клауса Фукса, немецкого физика-теоретика, эмигрировавшего сначала во Францию, а затем в Великобританию. О Клаусе Фуксе рассказали послу СССР в Великобритании И.М. Майскому, который был «в натянутых отношениях с резидентом НКВД в Лондоне Горским» [18], поэтому он посоветовал установить связь с Фуксом резидентуре военной разведки.

Руководителем лондонской резидентуры Разведуправления РККА был генерал-майор И.А. Складов (оперативный псевдоним «Брион»), связь с Фуксом осуществлял полковник С. Кремер (оперативный псевдоним «Барч»), а после того, как он отбыл в действующую армию (там за мужество и героизм в танковых сражениях ему было присвоено звание Героя Советского Союза, и он стал генералом) – Урсла Кучински («Соня»), которую привлек к работе в 1932 г. Рихард Зорге. В конце 1943 г. Фукс был приглашен в США и стал участником Манхэттенского проекта, не прекращая сотрудничества с советской разведкой [19, с. 54–59].

Чтобы правильно оценить полученную информацию, военной разведке требовалась квалифицированная консультация, которую в неразберихе начала войны получить было не так просто.

В декабре в Разведупр поступил второй доклад, а в январе 1942 г. – третий. В начале февраля было подготовлено письмо начальнику спецотдела АН СССР М.П. Евдокимову с просьбой дать рекомендацию, какие институты заинтересованы в информации по ядерной тематике. Но в соответствии с запросом вместо АН СССР материалы Фукса ушли в НКВД, где попали начальнику разведки П.М. Фитину. Его сотрудники готовили проект доклада Берии Сталину. Но лондонские материалы военной разведки носили столь ценный научно-технический характер, что проект доклада пришлось срочно переделывать.

В подготовленной в марте 1942 г. для И.В. Сталина записке [20] Л.П. Берия, докладывая полученные из Лондона сведения, назвал в качестве ведущих в СССР специалистов по расщеплению атомного ядра П.Л. Капицу, Д.В. Скобельцына и А.А. Слуцкого.

Видимо, основанием поставить Капицу во главе списка послужил факт предыдущей его работы у Э. Резерфорда, но в 1930-е и начале 1940-х гг. он занимался физикой низких температур и физикой сильных магнитных полей. Д.В. Скобельцын, хотя и был крупным специалистом по ядерной физике, но занимался в основном космическими лучами и был далек от вопросов ядерного деления. А.А. Слуцкий вообще занимался радиотехникой, в частности, генерацией высокочастотных колебаний [21].

Это говорит о том, что не стоит переоценивать рекомендации спецслужб. Информация, циркулирующая в когерентном сообществе профессионалов, куда более точна. Таким образом, первая попытка мобилизации по приказу оказалась весьма неудачной.

Л.П. Берия из-за подозрительного отношения к материалам разведки, которое «сохранялось у него даже тогда, когда в Советском Союзе уже полным

ходом развернулись работы по атомной бомбе» [22], доложил записку разведки НКВД и ГРУ, подготовленную П.М. Фитиным, «лишь 6 октября 1942 года, уже после того, как вопрос о создании отечественного центра для создания атомной бомбы был решен» [23, с. 428], т.е. более чем через год после поступления первых сообщений от «Вадима» и Фука.

В это время Г.Н. Флеров, техник-лейтенант одного из авиаполков, пишет с фронта письмо и пять телеграмм уполномоченному по науке ГОКО С.В. Кафтанову с призывом немедленно начать работы по созданию отечественного атомного оружия. Не получив ответа, он пишет два письма И.В. Сталину. В одном из них он просит созвать совещание с участием А.Ф. Иоффе, А.Е. Ферсмана, С.И. Вавилова, В.Г. Хлопина, П.Л. Капицы, А.И. Лейпунского, Л.Д. Ландау, А.И. Алиханова, Л.А. Арцимовича, Я.И. Френкеля, И.В. Курчатова, Ю.Б. Харитона, Я.Б. Зельдовича, А.Б. Мигдала, И.И. Гуревича, К.А. Петржака. Какой великолепный список ученых, из которых только шестеро были академиками, чтобы в силу статуса иметь какую-то известность, свидетельствующий о реальности когеренции физиков!

Письма Г.Н. Флерова почти совпали по времени с находкой фронтовых разведчиков. Во время операции по уничтожению вражеского гарнизона на Кривой косе близ Таганрога в феврале 1942 г. в портфеле убитого немецкого офицера Г. Вандервельде нашли тетрадь с непонятными формулами.

Известный разведчик, специалист по диверсиям полковник И.Г. Старинов, которому докладывали разведчики, заинтересовался тетрадью, и приказал сделать перевод. Переводчик смог сделать вывод, что офицер был физиком и занимался обоснованием процесса расщепления урана. Тетрадь переслали С.В. Кафтанову. Так было установлено, что немцы искали способы применения атомной энергии для военных целей. В конце февраля С.В. Кафтанов решил, что наступило время докладывать проблему И.В. Сталину и вместе с академиком А.Ф. Иоффе направил ему докладную записку с предложением об учреждении научного Центра для решения проблем атомного оружия. И.В. Сталин собрал совещание, на которое были вызваны А.Ф. Иоффе, Н.Н. Семенов, В.Г. Хлопин, и П.Л. Капица. Сталин резюмировал результаты совещания: «Надо делать» [23, с. 428–429]. И когда 28 сентября 1942 года вышло распоряжение ГОКО «Об организации работ по урану», в котором давались поручения АН СССР и ее конкретным институтам, а также АН УССР, благодаря установившейся к тому времени когеренции, физиков-ядерщиков удалось быстро собрать по эвакуированным институтам и вызвать из действующей армии.

После выхода распоряжения уполномоченный ГОКО по науке С.В. Кафтанов передал И.В. Курчатову для экспертизы три комплекта документов военной разведки (138 листов от 17 августа, 139 листов от 25 августа и 11 листов от 2 сентября 1942 г.). Ознакомившись с ними, он сел писать докладную В.М. Молотову, которую завершил 27 ноября 1942 года. Заканчивалась записка предложением привлечь к работе, помимо тех, что уже занимались ураном, А.И. Алиханова и его группу, Ю.Б. Харитона и Я.Б. Зельдовича, И.К. Кикоина, А.П. Александрова и его группу, А.И. Шальникова.

Для руководства работами И.В. Курчатов предложил учредить при ГОКО под председательством В.М. Молотова специальный комитет, в котором представителями от науки могли бы быть академики А.Ф. Иоффе, П.Л. Капица и Н.Н. Семенов. На следующий день В.М. Молотов, прочитав этот документ, с припиской «Прошу ознакомиться с запиской Курчатова» направил его И.В. Сталину.

Данные разведки докладывались И.В. Курчатову и в дальнейшем, правда, оберегая источники, ему запретили даже ближайшим сотрудникам рассказывать о том, что читал (в виде исключения он просил разрешения ознакомить с отдельными фрагментами донесений Я.Б. Зельдовича, Ю.Б. Харитона и некоторых других ученых из очень узкого круга, т.е. И.В. Курчатов был не транслятором получаемых данных, а стимулятором мысли ученых). И, что характерно, И.В. Курчатов делал в прочитанных документах пометки, кто тем или иным вопросом занимался в СССР, и с кем необходимо переговорить. Когеренция давала практический результат.

К сообществу физиков стали примыкать математики, которые помогали физикам-теоретикам рассчитывать реактор и каскады установок по газодиффузионному разделению изотопов урана, а также ожидаемые мощности атомных зарядов.

Первым крупным математиком, включенным И.В. Курчатовым в коллектив лаборатории № 2, был С.Л. Соболев, специалист в области дифференциальных уравнений математической физики. Он стал работать в секторе И.К. Кикоина, которому было поручено заниматься диффузионным методом разделения изотопов урана. На следующей фазе, уже собственно в атомном проекте роль математиков станет никак не меньшей роли физиков.

К началу 1944 г. штат Лаборатории № 2 состоял из 20 ученых и 30 человек вспомогательного персонала.

11 февраля 1943 г. ГОКО по инициативе учёных Г.Н. Флерова и И.В. Курчатова постановил начать экспериментальные работы по атомному

ядру [24]. В феврале же 1943 г. ГОКО утвердил постановление об использовании атомной энергии в военных целях. Курирование всех работ по атомной бомбе было возложено на В.М. Молотова, а его заместителем был назначен Л.П. Берия. Комиссия по урану была ликвидирована, и 31 августа 1943 г. было основано центральное учреждение Атомного проекта, аналог Лос-Аламоса в США, – Лаборатория № 2 АН СССР, которую возглавил И.В. Курчатов.

Через год Берия станет главным ответственным лицом за работы по атомной проблеме.

Элемент под номером 94 в таблице Менделеева, плутоний, был получен группой физиков Калифорнийского университета под руководством Г.Т. Сиборга в феврале 1941 г. Сообщение об этом было направлено в журнал *Physical Review* для публикации в мартовском номере. Однако американцы быстро поняли, какое значение имеет это направление создания атомной бомбы, и полностью закрыли даже упоминание о плутонии.

Производство плутония в значительной мере решает проблему, так как отпадает необходимость разделения изотопов урана, т.е. бомба могла быть сделана в значительно более короткие сроки. И.В. Курчатов узнал о плутонии из данных разведки в начале 1943 года. «Перспективы этого направления необычайно *увлекательны*», – писал И.В. Курчатов заместителю председателя СНК СССР М.Г. Первухину [25, (выделение в цитате – *Ю.Б.*). Из этой фразы видно, что советских физиков торопили не только военные события, но и необычайный внутренний интерес (увлекательно!) к сложнейшей задаче, которая и тянула решение из будущего.

И все же, несмотря на информацию о плутонии, И.В. Курчатов не прекращал работу по разделению изотопов урана, которые продолжались и в США, но предпочитал метод центрифугования, разработанный Ю.Б. Харитонов, хотя его технология и не была еще хорошо развита. По этой причине Ю.Б. Харитон и Я.Б. Зельдович еще в 1939 г. отклонили его, признав непрактичным.

Приоритет газовой диффузии в США и Англии как средства отделения ^{235}U от ^{238}U оказался неожиданным для И.В. Курчатова. Полученные разведкой данные заставили его пересмотреть планы и включить в них эксперименты по газовой диффузии [26].

Летом 1943 года начальник 3-го отдела 1-го управления НКГБ полковник Г.Б. Овакимян направил начальнику разведки П.М. Фитину записку о целесообразности объединения разведывательных возможностей по урановой проблеме двух ведомств. П.М. Фитин согласился и подготовил рапорт

наркому госбезопасности В.Н. Меркулову с предложением передать «всю разработку проекта «Энормоз»¹ и агентуры, работающей в этой области, 1-му управлению НКГБ» [19, с. 102].

Предложение было признано правильным с точки зрения координации и концентрации разведусилий (нужда в мобилизации начинала проявляться), хотя и несло риски потери ценных источников информации, для которых очень важен человек, которому они доверились и с кем работают.

И такой случай, к счастью завершившийся благополучно, произошел в феврале 1944 г. Руководитель нелегальной резидентуры военной разведки в Нью-Йорке Артур Александрович Адамс («Ахилл») предложил Центру привлечь к сотрудничеству одного из американских физиков, участвовавших в атомном проекте. Но ГРУ теперь требовалось согласовывать этот вопрос с НКГБ. В результате переписки между ведомствами выяснилось, что названный ученый является объектом разработки резидентуры НКГБ.

24 февраля Центр наложил запрет на встречу «Ахилла» с физиком, но ответ запоздал: назначенная на 23 февраля встреча состоялась, и «Ахилл» получил образцы чистого урана и бериллия, флакон «тяжелой воды», а также – всего на несколько часов 985 листов документов, которые он фотографировал всю ночь. И образцы, и фотодокументы и 19 листов сопроводительной записки быстро поступили в Москву. М.Г. Первухин и И.В. Курчатов дали им высочайшую оценку.

На нескольких следующих встречах информатор передал «Ахиллу» 2500 листов закрытых материалов, затем 1500 и, наконец, 3869 листов [19, с. 202–214] – темпы работ в американских лабораториях были необычайно высоки. Но вскоре этот источник на связь не вышел: американский физик получил лучевую болезнь, которая тогда была новостью, и ушел из жизни. Решение о передаче курирования «атомных» операций в руки разведки НКГБ имело отдаленное последствие: именно НКГБ вышло в общественном мнении на первый план в добыче атомных секретов, хотя результаты ГРУ, по крайней мере на описываемом этапе, были выше.

Информация поступала богатая – тысячи страниц документов и расчетов. Уравнения, технологии, конструкции описывались подробно, даже с размерами болтов.

Но первая заслуга разведки в создании атомной бомбы состояла в том, что при всем недоверии государственного руководства к науке и разведке именно

¹ Название агентурного дела операции внешней разведки НКВД-НКГБ по добытию для атомных секретов в США и Великобритании.

разведка первой достучалась до лиц, принимавших решения, в результате чего в 1942 году появилось распоряжение о развертывании работ по созданию советского ядерного оружия.

Вторая заслуга разведки – в том, что она помогла избежать дорогостоящих путей и сэкономить средства при создании атомной бомбы, что в условиях ограниченности ресурсов (в первую очередь урана и тяжелой воды), отсутствия ряда технологий (например, производства чистого графита в больших количествах) и военного времени было особенно ценно.

Перед физиками словно лежала «карта» с ветвящимися как дерево путями, теоретически ведущими к цели. И они все равно пришли бы к ней, но постоянно возвращаясь к развилкам и переходя на другую «веточку». Разведка, указывая верные ориентиры, позволила нашим физикам максимально сократить время, быстро миновать некоторые фазы работы, помогла избежать «осечки» при проведении первого атомного взрыва, имевшего огромное геополитическое значение. И это третья заслуга разведки.

При разных оценках того, сколько лет сэкономила физикам разведка, все они укладываются в обозначенную полосу неопределенности ($\pm 4,5$ года). Это означает, что атомный проект развивался вполне естественным для науки темпами, учитывая как все возникающие препоны, так и любую помощь.

От стран «оси» до союзников

Посмотрим теперь, как обстояли дела у Германии и у союзников. Поначалу главным объектом разведки стала Германия, поскольку считалось, что, прежде всего, она способна решить задачу: хорошо развиты физика и химия, проводятся эксперименты по центробежному разделению изотопов урана и, главное, оккупировав в 1940 г. Бельгию, немцы получили почти половину мирового запаса урана – 1200 тонн уранового концентрата, добывавшегося в Бельгийском Конго (вторую половину удалось переправить из Катанги, провинции Конго, в США, первые американские атомные бомбы впоследствии были сделаны из этого урана). Затем, захватив Чехословакию, Германия начала осваивать урановые шахты и там, возле Йоахимсталя. О том, что немцы разрабатывают урановые месторождения в Судетских горах, военная разведка узнала от сотрудничавшего с нею Франтишека Моравца («Барон»), руководителя чехословацкой разведки в Лондоне через «Бриона».

В апреле 1939 г. гамбургские физики Пауль Хартек и его помощник Вильгельм Грот написали в германское Имперское военное министерство письмо, в котором указали на возможность создания нового вида оружия на основе достижений ядерной физики. Армейское артиллерийское управление

приняло предложение и сразу же засекретило работы. Так Германия стала первой великой державой, давшей ядерной программе государственный статус.

В декабре 1939 г. Вернер Карл Гейзенберг (Нобелевская премия по физике 1932 года) и Карл Фридрих фон Вайцзекер провели серию экспериментов с цепной реакцией и пришли к выводу, что германский атомный проект возможен с двумя видами замедлителей – графитом и тяжелой водой.

В январе 1940 г. погрешность в измерении, которую допустил Вальтер Боте (он использовал загрязненный бором графит), завершила эксперименты с графитом.

С тех пор основное внимание было сосредоточено на производстве тяжелой воды для ядерного реактора. Единственное существовавшее производство – 10 кг/месяц – находилось в Норвегии (Norsk Hydro, Рьюкан). Немцам в их просьбе продать тяжелую воду было отказано, и все ее запасы достались Франции (фактически Ф. Жолио-Кюри). Доставку тяжелой воды обеспечивали спецслужбы. Для перевозки не слишком скрытно готовился самолет, который немцы легко перехватили и посадили, но в опечатанных канистрах оказалась обычная вода. А когда в июне 1940 года немцы вошли в Париж, тяжелую воду уже перевезли в Великобританию. Немцы все же принудили норвежскую компанию к сотрудничеству, но мощности фабрики были недопустимо малы, а после диверсии 1942 года и вовсе прервались. Едва производство возобновили в 1943 году, бомбардировкой англо-американской авиации фабрика была полностью разрушена.

Немцы позволили себе одновременную разработку двух крупных реакторов разного типа, причем наиболее неудачную конструкцию строил В. Гейзенберг (возможно, намеренно), и ему как нобелевскому лауреату доставался и уран, и тяжелая вода, и финансирование. Проект Курта Дибнера снабжался по остаточному принципу. Впрочем, в начале лета 1942 г. Гейзенберг погиб при взрыве в своей лаборатории.

Что же касается обогащения урана изотопом ^{235}U , то немецкие ученые разработали семь (!) способов, но при этом, как ни удивительно, совершенно не приняли во внимание эффективный способ противопоточной диффузии через пористую перегородку, предложенный в 1934 г. немецким же ученым Густавом Людвигом Герцем (Нобелевская премия по физике 1925 года), возглавлявшим все это время научно-исследовательскую лабораторию Сименса в Берлине. В 1942 году физик Эрих Багге создал работоспособную установку для обогащения урана.

Тем не менее надо отдать должное немецким физикам: они, когда

советские войска уже вступали в Берлин, все еще надеялись запустить реактор К. Дибнера. Его перевезли в деревушку Хайгерлох. Но американцы, проводя операцию «Алсос-2», в которой участвовали, помимо военных разведчиков, специалисты по безопасности Манхэттенского проекта и ученые, стремительно переправили в США и физиков, и комплектующие реактора, и уран, и тяжелую воду [27]. (Ныне в музее города Хайгерлох выставлена копия ядерного реактора.) Из советской зоны оккупации (г. Штасфурт) американские военные также вывезли около тысячи тонн бельгийского урана. Советскому Союзу досталось лишь семь тонн металлического урана (окись урана) и около 300 тонн урановых соединений.

В Германии процесс когеренции физиков не пошел по ряду причин. Во-первых, ввиду господствующего во всех областях немецкой жизни знаменитого «орднунга» (порядка) трудно было говорить о турбулентных условиях, необходимых для зарождения когеренции. Во-вторых, атмосфера созданной нацистами «арийской» физики способствовала разобщению ученых и взаимной подозрительности, но никак не их консолидации. В-третьих, многих немецких ученых уволили из институтов и призвали в армию, где они несли службу наравне со всеми, и их научный потенциал не использовался, как во многих случаях в Советском Союзе, для защиты кораблей от магнитных мин, для создания баллистических таблиц стрельбы, для создания новых взрывчатых веществ или более крепкой танковой брони и т.д.

Лишь в сентябре 1944 г. М. Борман запретил призывать научных работников на военную службу или привлекать их к выполнению каких-либо повинностей, не имеющих отношения к их основной профессии.

История создания атомной бомбы в США широко известна, поэтому ее описание сведем к предельно краткому.

В 1939 году А. Эйнштейн направил президенту США Ф. Рузвельту письмо, которое инициировали физики-эмигранты из Венгрии Л. Сцилард, Ю. Вигнер и Э. Теллер. В письме обращалось внимание на важность опережающих исследований по ядерной физике, поскольку Германия далеко продвинулась и близка к обладанию атомной бомбой. После письма Эйнштейна в США был создан Урановый комитет. В 1940 году все работы по урану засекретили.

В 1942 году под руководством Ферми был создан и запущен реактор, и началось осуществление Манхэттенского проекта. В 1943 года организуется Лос-Аламосская лаборатория, и в 1945 году, спустя всего шесть лет после первых лабораторных академических экспериментов, был произведен взрыв ядерного заряда, который в том же году использовался в Хиросиме и Нагасаки.

В США не было процесса когеренции физиков-ядерщиков. Там создалась высокая концентрация физиков-эмигрантов из Европы, которые все были взяты под контроль по прибытии в США, и многие из них вовлечены в Манхэттенский проект.

Так же в 1940 году начался британский оружейный урановый проект. Для руководства работами правительство создало комитет «MAUD». Поначалу в Великобритании работы велись активнее, чем в США. И отчеты направлялись в США.

В 1941 году, когда представитель комитета «MAUD» прилетел в США, выяснилось, что в целях полной секретности отчеты просто складывались в сейф и никому не показывались. Секретность во всех странах была выше всяких похвал. В 1941 году писатель-фантаст Хайнлайн в повести «Неудовлетворительное решение» описал, как американцы в конце войны создадут из урана-235 бомбу и сбросят ее на крупный город противника [28]. Хайнлайна попытались привлечь к ответственности за разглашение государственной тайны. «Парадокс Хайнлайна» говорит о том, что абсолютной секретности быть не может, даже если секретные документы, как в случае с английскими отчетами, не показывать вообще никому. И, как результат, эффективные действия советской разведки, сделавшей не только очень много, но и в период, когда это было критически важно. Нужно заметить также, что разведка Великобритании от своих агентов («Гренвилль» из Управления вооружений, курировавшего в Германии урановый проект, а также «Гриффин») и Управление стратегических служб США (Эрвин Респондек – «Ральф»), хотя и не в таком объеме, также получали информацию из весьма компетентных немецких источников.

Создать свою атомную бомбу и даже опередить США пыталась и Япония. Это говорит о том, что само развитие физики подвело к раскрытию «тайны» расщепления атомного ядра. И какой бы тайной ни окутывали исследования по ядерной физике в той или иной стране, ученые добились бы успеха. Другое дело, что в условиях мировой войны, в условиях дефицита времени и ресурсов, любая помощь ученым была особенно важной. Именно эту функцию и выполняли спецслужбы воюющих стран.

В мае 1941 г. на семинаре в Университете города Киото японский физик Токутаро Хегивара заявил, что делящийся изотоп урана «имеет большую возможность стать полезным как инициатор ядерного горения» [26, с. 125].

В 1942 г. сотрудник аппарата военного атташе майор А. Косицын узнал от профессора Иосио Нисина из Института физико-химических исследований, который в довоенное время учился в Копенгагене и слушал в Институте

теоретической физики лекции Н. Бора, что в мае 1941 г. военный министр Японии Хидэки Тодзио поставил перед начальником научно-технического управления ВВС Японии генералом Такео Ясуда задачу создания урановой бомбы. Работы сосредоточили в Институте физико-химических исследований, руководство поручили И. Нисина. В его подчинении было около ста ученых. Вскоре к проекту подключился императорский военный флот. Под его эгидой был учрежден Комитет по прикладному использованию ядерной физики. В него вошли Риоките Сагане, ранее стажировавшийся в Калифорнийском университете, Ценесабура Асаде, Бунсаку Аракацу и Масаси Кикиути. Председателем комитета стал И. Нисина. По начальной букве его фамилии работы получили название «Проект Эн».

В 1942 г. японская агентурная разведка добыла первые сведения о работах над бомбой в США. В Японии поняли, как именно им отзовется Пёрл-Харбор, и всюду стремились опередить США. В мае 1943 г. И. Нисина доложил командованию о технической осуществимости создания урановой бомбы. В 1944 г. было успешно проведены испытания опытного образца сепаратора для разделения изотопов урана методом газовой диффузии (он вскоре оказался разрушен в результате американской бомбардировки). Однако и американская разведка, и ГРУ (по поступавшим данным А. Косицына) пришли к выводу, что ресурсов (в первую очередь урана) у Японии для создания бомбы не хватит [19, с. 267–275].

Атомный проект: компрессия послесловия

По существу, сам атомный проект лежит за пределами нашего рассмотрения. Поэтому опишем его крайне сжато в форме таблицы в качестве небольшого послесловия (см. табл. 2). Заметим, что по результатам войны из атомной гонки выбыли Германия и Япония, но помимо США оставалась Великобритания. В 1956 г. в нее включилась Франция.

Итак, Соединенным Штатам для создания атомной бомбы потребовалось 6 лет, Советскому Союзу 7 лет (включая сюда период предварительной когеренции – 3 года), Великобритании – 6 лет (или 9 лет с учетом работ 1940–1943 гг. до включения в Манхэттенский проект), Франции 5 лет. Сроки очень похожие, несмотря на значительное преимущество США, собравших в Манхэттенском проекте почти все лучшие силы физиков-ядерщиков мира. При этом разведслужбы перечисленных стран, а также разведок Германии и Японии, так и не успевших создать бомбу, работали «все против всех». Таким образом, перераспределение необходимого ученым информационного ресурса, поступающего по разведывательным каналам, выравнивало общее

Краткая хронология атомного проекта СССР на мировом фоне

Год	Событие	Комментарий
1945	16 июля – первый ядерный взрыв	Аламогордо (Нью-Мексико, США)
1945	6 и 9 августа – атомные бомбы сброшены на Японию	Хиросима (урановая бомба «Мальш») и Нагасаки (плутониевая бомба «Толстяк»)
1945	20 августа ГОКО создает Специальный комитет при Совнаркоме СССР, в задачу которого входило в сжатые сроки создать атомное оружие. При Спецкомитете создаются: - Технический совет - Инженерно-технический совет	Председ. Л.П. Берия, зам. Б.Л. Ванников и зам. М.Г. Первухин. Науч. рук. И.В.Курчатов, члены: Н.А. Вознесенский, А.П. Завенягин, П.Л. Капица, Г.М. Маленков, В.А. Махнёв. Техсовет, рук. Б.Л. Ванников, члены: А.Ф. Иоффе, И.К. Кикоин, П.Л. Капица, И.В.Курчатов, Ю.Б. Харитон, В.Г. Хлопин. Инж.-тех. Совет, рук. М.Г. Первухин
1945	Записка Я.И. Френкеля (ЛФТИ АН СССР) И.В. Курчатову	Идея использования энергии взрыва атомной бомбы для реализации ядерного синтеза легких элементов
1945	Техсовету Спецкомитета при СНК СССР доложены материалы разведки	Аналогичная идея для американской сверхбомбы
1945	Поручение Техсовета Спецкомитета И.В. Курчатову, А.И. Алиханову и Ю.Б. Харитону	Рассмотреть возможность создания сверхбомбы в СССР
1946	Создание при Лаборатории № 2 АН СССР Центра по разработке ядерного и термоядерного оружия	Конструкторское бюро №11 (КБ-11, Саров) Начальник П.М. Зернов. Главный конструктор Ю.Б. Харитон
1946	В СССР запущен ядерный реактор	И.В. Курчатов
1947	Группа специалистов изучает идею термоядерной бомбы «Супер» Э. Теллера	Информация передана К. Фуксом Руководитель группы Я.Б. Зельдович
1947	Группа теоретиков (ФИАН) проводит теоретические исследования по новому варианту водородной бомбы	Руководитель И.Е.Тамм. В группе работает молодой к.ф.-м.н. А.Д. Сахаров
1948	Предложен новый вариант водородной бомбы	«Слойка» (А.Д. Сахаров). Использование дейтерида лития-6 (В.Л. Гинзбург)
1949	29 августа в СССР осуществлен первый ядерный взрыв	В арсенале США уже имелось около тысячи атомных бомб
1949	Отчет А.Д. Сахарова по «Слойке»	Первый его отчет в группе

		И.Е. Тамма
1950	КБ-11 становится главным центром по разработке советского ядерного оружия	Из ЛИПАНа КБ передано в ПГУ при Совете Министров СССР – будущее Министерство среднего машиностроения
1952	Нетранспортабельный водородный заряд (США). Масса 82 тонны	Первый в мире термоядерный взрыв (прототип водородной бомбы)
1952	Великобритания произвела взрыв собственной атомной бомбы	Решение о создании атомной бомбы независимо от США принято в 1947 г.
1953	Водородная бомба «Слойка» (СССР)	Транспортабельный боеприпас РДС-6с
1954	Транспортабельный водородный заряд (США)	В США на вооружение поступили первые термоядерные бомбы
1954	Начала работу первая в мире атомная электростанция	Выведена из эксплуатации в 2002 г. Научный мемориальный комплекс
1955	Первая термоядерная бомба, сброшенная с самолета (СССР)	РДС-37 авиационный боеприпас, впоследствии адаптированный для других стратегических носителей
1956	Термоядерная бомба, сброшенная с самолета (США)	ТХ-15-Х1 (Мк-15)
1956	Президент Франции Ш. де Голль принимает решение о создании ядерного оружия	Научным руководителем французского атомного проекта назначен Ф. Жолио-Кюри
1960	Франция произвела испытание первого ядерного устройства	Изготовлено под руководством Б. Голдшмидта
1962	В НАТО утвержден «План ядерной войны» № 200/61 от 10.01.62	Добыт советской разведкой в 1965 г.
1970-е годы	Ядерный паритет с США	Завершается фаза полномасштабного промышленного освоения атомной энергии

За успешное испытание первого советского атомного устройства звание Героя Социалистического Труда было присвоено 33 ученым (включая немецкого физика Н.В. Рилля), инженерам и руководящим работникам. Более 800 научно-технических работников награждены орденами. Сотрудники внешней разведки НКГБ Л.Р. Квасников, Н.С. Сазыкин, А.С. Феклисов и А.А. Яцков также награждены орденами. Ни один военный разведчик не попал в число награжденных. Клаус Фукс не был награжден ни одной советской наградой до конца своих дней. Помимо тех разведчиков, о которых рассказывалось в статье, хотелось бы упомянуть еще двоих.

Нелегал ГРУ Жорж Абрамович Коваль («Дельмар») работал на секретном объекте в закрытом атомном городе Ок-Ридж (Теннесси, США), столь секретном, то даже Клаусу Фуксу, который занимался математическим аппаратом газодиффузионного процесса и разрабатывал его технологию, ни

разу не удалось посетить этот ядерный комплекс. В Ок-Ридже производились обогащенный уран и плутоний, который военными самолетами отправляли в Лос-Аламосскую лабораторию. Дельмар бесперебойно поставлял ценнейшую информацию. Примечательно, что Дельмар не имел офицерского звания. Он был зачислен на военную службу рядовым и, возвратившись после войны в Советский Союз, демобилизовался рядовым и работал научным сотрудником в одном из институтов.

Яну Петровичу Черняку («Джек») передавал информацию британский физик Алан Мэй. В Канаде связь с Мэем осуществлял Петр Никитович Ангелов («Бакстер»). В частности, 4 ноября 1945 г. в Москву от него был доставлен образец (162 микрограмма) урана-235, который представлял особый интерес для советских физиков, 5 ноября впервые получивших в Лаборатории № 2 под руководством Л.А. Арцимовича 70 микрограмм урана-235. Мэй также передал «Бакстеру» доклад Э. Ферми об устройстве и принципе действия уранового котла.

За мужество и героизм при выполнении специальных заданий присвоено звание Героя России военным разведчикам: Я.П. Черняку в 1994 г. (за несколько дней до ухода из жизни), А.А. Адамсу в 1999 г. (посмертно), Ж.А. Ковалю в 2007 г. (посмертно).

За выдающийся вклад в обеспечение безопасности нашей страны в 1995 г. звание Героев России присвоено разведчикам НКГБ-МГБ-КГБ: Моррису Коэну в 1995 г. (посмертно), и в 1996 г. – Леонтине Коэн (посмертно), Л.Р. Квасникову (посмертно), А.А. Яцкову (посмертно), В.Б. Барковскому и А.С. Феклисову.

Было бы справедливо, наконец, отметить государственными наградами заслуги Клауса Фукса, Ф.Ф. Ланге и многих других участников атомного проекта – ученых и разведчиков.

* * *

Когеренция физиков-ядерщиков в фазе, предшествующей атомному проекту, – не уникальный феномен, присущий исключительно СССР (хотя в истории советской науки можно привести и другие схожие примеры), а скорее, яркая иллюстрация явлений самоорганизации в условиях социальной турбулентности [29]. Например, решение аналогичной задачи в Индии, Пакистане, КНДР.

Эта когеренция помогла стремительному старту атомного проекта в СССР, так что фактическое его начало в 1942–1943 гг. даже опередило установленную позже официальную дату отсчета. Когеренция стала одним из

факторов, которые помогли существенно отстававшему в научно-техническом отношении от Соединенных Штатов Советскому Союзу в тяжелейшее время войны и первые послевоенные годы догнать и даже опередить США. Когерентное сообщество не распалось при вхождении ядерных исследований в фазу атомного проекта (с 1945 г.) и даже демонстрировало государству свою мощь: физики, которых оставили в покое идеологические силы, близкие власти, поскольку стране (и власти) необходимо было ядерное и термоядерное оружие, старались спасти биологию и генетику. Нужна была защита от радиации, а потому по инициативе физиков создавались радиологические институты и отделы в других институтах [30]. Даже кибернетика была «помилована», поскольку чрезвычайно нужны были высокопроизводительные вычислительные машины для той же цели (а также для развития ракетно-космической техники).

Самоорганизация не менее важна, а иногда и эффективнее, чем мобилизация.

Литература

1. Алексеев В.В., Литвинов Б.В. Советский атомный проект как феномен мобилизационной экономики. – Вестник РАН, 1998, т. 68, № 1, с. 9–22.
2. Колмогоров А.Н. Уравнения турбулентного движения несжимаемой жидкости. – Известия АН СССР, Сер. физ. 1942, том 6, № 1–2, с. 56–58.
3. Shiryayev A.N. Kolmogorov and the Turbulence. – Workshop «Turbulence and Finance», May, 5–7, 1999. – Aarhus University, MaPhySto, The Danish National Research Foundation, 1999, p.14.
4. Briot, C. and Bouquet, J. Propriétés des fonctions définie par des équations différentielles. J. l'Ecole Polytechnique, Cah. 36, 1856, p.133–198.
5. Пуанкаре А. О кривых, определяемых дифференциальными уравнениями / Пер. с фр. – М.-Л.: ОГИЗ, 1947. – 392 с.
6. Батурин Ю.М., Доброчеев О.В. Периодическая таблица критических событий в космонавтике. – В кн.: Космонавтика XXI века. Попытка прогноза развития до 2101 года // Под ред. акад. Б.Е. Чертока. – М.: Издательство «РТСофт», 2010, с. 675–710.
7. Батурин Ю.М. Моделирование как вспомогательный инструмент истории науки и техники. Вестник Российской академии наук, 2013, том 83, № 1, с. 3–9.
8. Храмов Ю.А. История физики. – Киев: «Феникс», 2006, с.124–133.
9. Вернадский В.И. Записка об организации при Российской академии наук Государственного Радиового института. – Вернадский В.И. Собр. соч. в 24-х томах. Том 12. Организация науки. – М.: «Наука», 2013, с. 132–135; его же: Записка Совета Государственного Радиового института по вопросу о форме связи его с Российской

академией наук. – там же, с. 136–137.

10. Вернадский В.И. О необходимости создания научно мощного Всесоюзного радиового института в срочном порядке. – Вернадский В.И. Собр. соч., том 12, с. 140, 141, 142.

11. Вернадский В.И. Новые открытия в области радия. – Вернадский В.И. Собр. соч., том 12, с.171,172.

12. Фортов В.Е. Заметки о науке. – М.: «РТСофт» - «КОСМОСКОП», 2016, с.241.

13. Вернадский В.И., Ферсман А.Е., Хлопин В.Г. Письмо заместителю Председателя Совнаркома товарищу Н.А. Булганину. – Вернадский В.И. Собр. соч., том 12, с.155.

14. Лобиков Е.А. Современная физика и атомный проект. – Москва – Ижевск, Институт компьютерных исследований, 2002, с. 111.

15. Капица П.Л. – И.В. Сталину. 30 июля 1952 г. – «Известия ЦК КПСС», 1991, № 2, с. 107–108.

16. Вернадский В.И. Записка о необходимости возобновления работ урановой комиссии. – Вернадский В.И. Собр. соч., том 12, с. 334.

17. Очерки истории Российской внешней разведки в шести томах. Том 4. 1941–1945 годы. – М.: «Международные отношения», 1999, с. 428.

18. Судоплатов П.А. Разведка и Кремль. – М.: ТОО «Гея», 1996, с. 229.

19. Лота В. ГРУ и атомная бомба. Неизвестная история о том, как военная разведка добывала сведения об атомных проектах Великобритании, Германии, США и Японии. – М.: ОЛМА-ПРЕСС, 2002, с. 54 – 59.

20. Л.П. Берия – И.В. Сталину / Вопросы истории естествознания и техники, 1992, № 3, с. 109–111.

21. Визгин В.П. У истоков советского атомного проекта: роль разведки, 1941-1946 гг. (по материалам архива внешней разведки России) / Вопросы истории естествознания и техники, 1992, № 3, с. 99.

22. Яцков А.А. Атом и разведка / Вопросы истории естествознания и техники, 1992, № 3, с. 105.

23. Очерки истории Российской внешней разведки в шести томах. Том 4, с. 428.

24. Наука и общество. История советского атомного проекта» (1940–1950-е гг.). Труды Международного симпозиума. М.: ИзДАТ, 1997. Т. 1. 392 с.; Атомный проект СССР. Документы и материалы / отв. ред. Л.Д. Рябев. В 3 т. 1938–1945. М.: Наука, 1998.; Щербаков В.А. Лаборатория № 1 и атомный проект СССР. Саров: РФЯЦ; ВНИИЭФ, 2005. 155 с.

25. И.В. Курчатов – М.Г. Первухину / Вопросы истории естествознания и техники, 1992, № 3, с. 116.

26. Лобиков Е.А. Современная физика и атомный проект. – Москва – Ижевск, Институт компьютерных исследований, 2002, с. 110–124.

27. Гоудсмит С.А. Миссия Алсос. – М.: Госатомиздат, 1963. – 192 с.

28. Heinlein R.A. Solution Unsatisfactory. - In: The Worlds of Robert A. Heinlein. – London, 1970, p. 92–127.

29. Вихревая динамика развития науки и техники. Россия/СССР. В трех томах // Под ред. Ю.М. Батурина. Том II. Экстремальный режим развития науки и техники. – М.: ИИЕТ РАН; Саратов: «Амирит», 2018, с. 176–232, 397–424.

30. Визгин В.П., Кессених А.В., Томилин К.А. К исследованию феномена советской физики 1950–1960-х гг. Социокультурные и междисциплинарные аспекты. – СПб.: РХГА, 2014, с. 474–550.

А.А. Широ́в¹

ОЦЕНКА МАКРОЭКОНОМИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ СТРОИТЕЛЬСТВА ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ²

Атомный проект и советская экономика

Было бы неправильно обойти вниманием вопрос о том, чем было создание атомного комплекса для экономики СССР. Атомный проект был для нашей науки и экономики столь важным, что сейчас, по прошествии многих десятилетий, хотелось бы еще раз вернуться к вопросу оценки его влияния на структурные сдвиги в нашей экономике, которые происходили в 40–50-е годы XX столетия.

Оценка происходившего в те далекие годы представляет не только исторический, но и практический интерес, позволяет оценить потенциальные возможности экономической политики при реализации инновационных, прорывных проектов.

Если говорить о масштабах проекта, то здесь можно привести следующие данные. Только за 1946–1948 гг. на его реализацию было выделено почти 20 млрд руб. в ценах тех лет, а, например, на восстановление пострадавших в результате войны городов РСФСР всего 1,3 млрд руб. При этом нельзя сказать, что финансирование второго направления производилось по остаточному принципу. Как показывает статистика, во всех городах, за исключением по понятным причинам Сталинграда, жилой фонд и социальная инфраструктура за этот период были восстановлены до 70% и выше от довоенного уровня. Таким образом, можно сказать, что объем выделяемых на атомный проект средств был беспрецедентным.

Для оценки влияния развития атомного комплекса на экономику СССР мы воспользовались данными баланса народного хозяйства, которые разрабатывались в 60-е годы Ю.В. Яременко и его коллегами в Экономическом институте Госплана СССР.

Нужно отметить, что после войны советская экономика оставалась все еще достаточно примитивной и существенно отставала по уровню

¹ Директор Института народно-хозяйственного прогнозирования РАН, член-корреспондент РАН.

² По материалам доклада на заседании общего собрания ООИ РАН.

используемых технологий и эффективности от ведущих стран мира. Например, в 1950 г. сельское хозяйство занимало в валовом выпуске почти 24%, а с учетом пищевой и легкой промышленности на низкотехнологичные виды деятельности приходилось более 50% советской экономики. В свою очередь, на долю машиностроения приходилось лишь 8,7%, а на химию лишь 1,7%.

Атомный проект был не только крупнейшим направлением реализации капитальных затрат в послевоенной экономике СССР, но и воздействовал на всю систему межотраслевых связей (рис. 1).



Рис. 1. Формирование мультипликативного эффекта от капитальных затрат в рамках атомного проекта в 1950 г., млн руб.

Источник: ЦСУ СССР, [1, 2], расчеты ИНИ РАН

Например, при общем объеме капитальных затрат на развитие атомной отрасли в 1950 г. в объеме 4 млрд руб. с учетом мультипликативных эффектов общий рост производства от этих затрат составлял почти 9 млрд руб. Из этого объема 2,5 млрд руб. приходилось на строительство и еще 2,1 млрд руб. на машиностроение. Таким образом до 8% валового выпуска экономики СССР в 1950 г. формировалось на основе капитальных затрат в рамках атомного проекта.

Разумеется, что столь существенное влияние на экономику, которое осуществлялось за счет развития атомной отрасли в течение десятилетий, позволило решить сразу несколько задач. Наряду с сокращением отставания, а затем и формированием паритета по стратегическим вооружениям атомный проект серьезно повлиял на структуру советской экономики. Был дан существенный импульс к развитию таких высокотехнологичных секторов экономики, как химия, ракетно-космическая отрасль, энергетика и многих других. Произошло общее усложнение системы кооперационных связей в экономике, а значит, со всеми оговорками про ее командно-административный характер, увеличились доходы.

Атомная отрасль в современной российской экономике

В результате реализации атомного проекта наша экономика получила мощную отрасль, особенностью которой является наличие двух взаимосвязанных элементов: атомного оружейного комплекса и мирного использования атома.

Произошло это потому, что эффективное использование достижений в области ядерных исследований требует наличия мощного гражданского сегмента атомной промышленности. Такая конфигурация позволяет обеспечить взаимодействие науки и производства и компенсировать часть затрат на военный сегмент атомной промышленности. Отсюда можно сделать вывод о том, что крупные ядерные державы Россия, Китай, США, Франция, Великобритания в обозримой перспективе не откажутся от атомной энергетики и других направлений использования мирного атома.

В России большая часть атомного комплекса сконцентрирована в Государственной корпорации «Росатом». Основные направления ее деятельности: горнорудная промышленность, машиностроение, производство топлива, энергетика, инжиниринг и прочее. Совокупно – это 1,15 трлн руб. в ценах 2019 г. или 0,5% валового выпуска российской экономики. Вроде бы это не так много.

Однако в экономической деятельности производство и затраты мультиплицируются за счет увеличения производства в смежных секторах, возникновения дополнительных доходов (прибылей, налогов и зарплат) и их последующего перераспределения. В этом случае важно понимать, как производство в рамках ГК «Росатом» трансформируется в итоговые доходы

(ВВП) с учетом прямых и обратных связей, существующих в экономике. Инструментом такого оценивания могут быть как данные корпорации и ее смежников, так и таблицы «затраты-выпуск», широко используемые в мировой практике для такого рода расчетов [Miller R. E., Blair P.D., 2009].

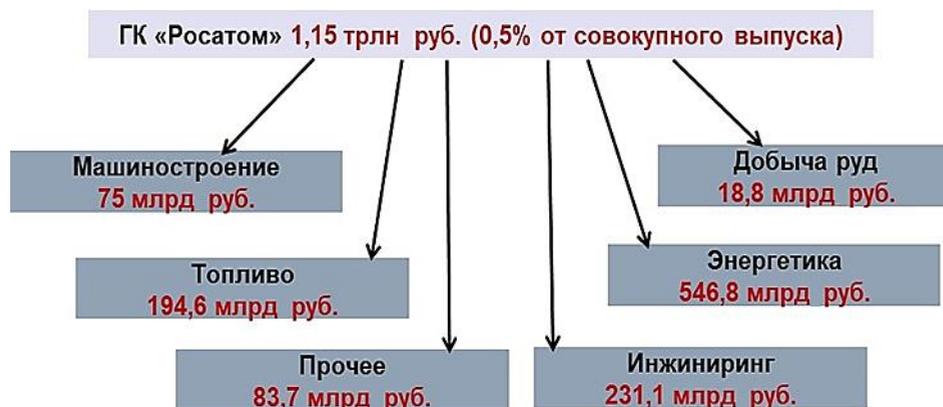


Рис. 2. Структура выручки ГК «РОСАТОМ» в 2019 г.
Источники: консолидированная отчетность ГК «Росатом» за 2019 г., расчеты ИПП РАН

В этом случае полные эффекты существенно возрастают. Полный эффект на ВВП – 1489 млрд руб. – 1,4% ВВП. Удельный мультипликатор на ВВП (прямые и косвенные эффекты) – 1,3 руб. на каждый рубль прироста производства.

На рис. 3 приведено распределение эффектов по направлениям деятельности.

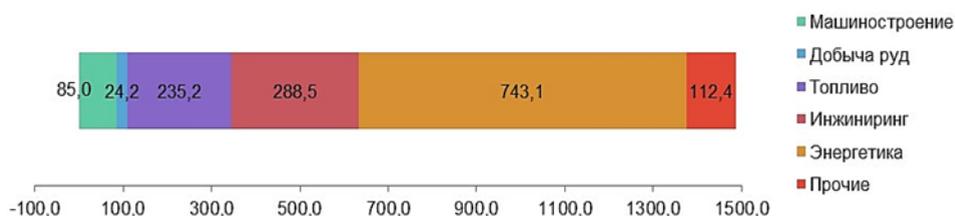


Рис. 3. Распределение прямых и косвенных эффектов на ВВП по направлениям деятельности, млрд руб., 2019 г.

Таким образом, атомная отрасль в современной российской экономике является одной из системообразующих еще и потому, что она обладает

полным циклом производства от добычи руды до производства машин и оборудования для атомной энергетики, а также включает в свой состав крупный строительный комплекс, позволяющий реализовывать проекты как на территории страны, так и за рубежом.

Механизмы формирования экономических эффектов в атомном секторе – это достаточно сложная система взаимодействий (рис. 4).

Современные возможности межотраслевых расчетов позволяют значительную часть этих эффектов количественно оценивать. С использованием методологии «затраты-выпуск» возможно оценивать прямое и косвенное влияние развития атомного комплекса и на расходы бюджета, и на занятость, и на изменение параметров выбросов парниковых газов.

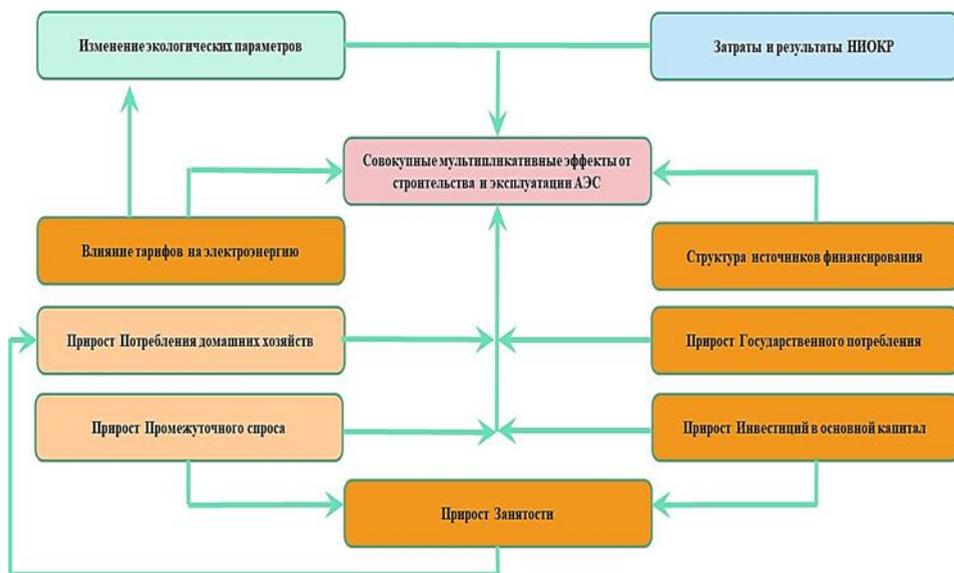


Рис. 4. Совокупность эффектов, формируемых атомным комплексом

Наиболее сложной задачей, которая сейчас стоит перед экономической наукой, является оценка влияния на экономику прямых и полных затрат на исследования разработки. Проблема состоит в том, что в отличие от эффектов от производства расчет для затрат на исследования и разработки предполагает имеет более длительный цикл. Он, как минимум, должен включать в себя этап внедрения, который является переходным от исследований и разработок к производству.

Наш подход состоит в том, что для такого роста расчетов может использоваться композитный мультипликативный расчет, который сочетает в себе оценку прямых и косвенных эффектов на стадии НИОКР, внедрения и производства. Понятно, что за счет удлинения цепочек взаимодействия такого рода комплексные эффекты должны быть выше тех, которые оцениваются только на инвестиционной и производственных стадиях взаимодействий в рамках строительства объектов атомной инфраструктуры.

Если рассматривать методологию расчета экономических эффектов от строительства объектов атомной энергетики, то она распадается на четыре ключевых этапа.

Первый этап – оценка прироста выпуска в рассматриваемом и смежных секторах и (через структуру затрат) по всей экономике. Основой здесь является структура затрат, которая для каждого вида деятельности определяется набором используемых технологий. Соответственно, при увеличении спроса на продукцию атомного сектора происходит изменение спроса на все виды затрат, которые используются для строительства или эксплуатации АЭС (строительные материалы, топливо, транспортные затраты и т.д.).

Второй этап – оценка прироста добавленной стоимости (доходов) в атомной отрасли и всех смежных секторах, а затем через систему межотраслевых связей во всех секторах экономики.

Третий этап – распределение новых доходов (зарплат, налогов, прибыли) в дополнительное потребление домашних хозяйств, государственное потребление, инвестиции.

Четвертый этап – оценка итогового прироста ВВП, производства, занятости и доходов бюджета за счет дополнительного роста конечного спроса [4].

С учетом фактически сложившейся структуры затрат совокупный инвестиционный мультипликатор атомной энергетики (на фазе строительства АЭС) в России может оцениваться в 0,92 руб. дополнительного прироста ВВП на каждый рубль инвестиционных затрат, а производственный мультипликатор (на фазе эксплуатации АЭС) в 0,78 руб. дополнительного прироста ВВП на 1 руб. прироста производства.

Не менее важными являются мультипликаторы на занятость и доходы бюджета (рис. 5).

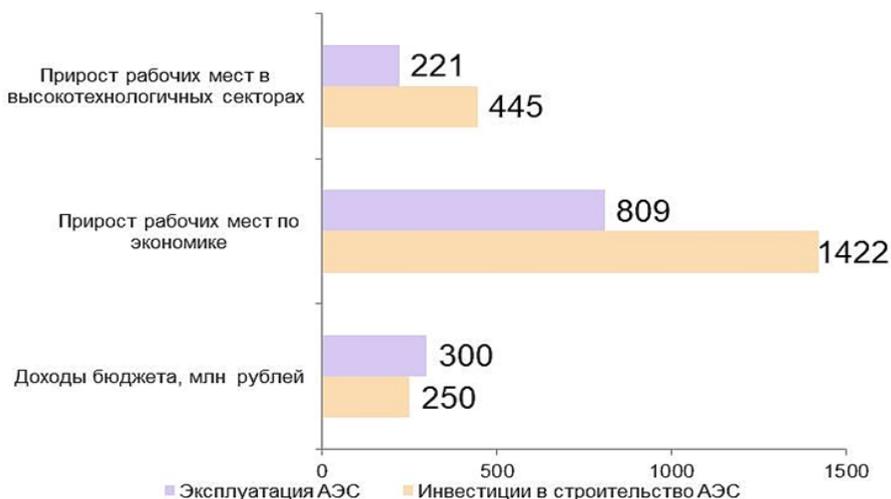


Рис. 5. Мультипликаторы строительства и эксплуатации АЭС в России на 1 млрд руб. затрат

Каждый миллиард инвестиционных затрат на стадии строительства АЭС формирует дополнительно 445 новых рабочих мест в высокотехнологичных секторах российской экономики¹. На этапе эксплуатации рост производства на 1 млрд руб. формирует дополнительно не менее 221 новых рабочих мест в высокотехнологичных секторах российской экономики. В целом по экономике 1 млрд руб. инвестиционных затрат в строительство АЭС обеспечивает увеличение числа рабочих мест на 1422, а рост производства на аналогичную величину на эксплуатационной стадии 809 новых рабочих мест.

Кроме того, каждый миллиард рублей инвестиционных затрат при реализации проектов строительства АЭС в России формирует не менее 250 млн руб. дополнительных объемов доходов консолидированного бюджета, а на этапе эксплуатации эта величина на каждый млрд руб. увеличения производства составляет до 300 млн руб.

Таким образом мультипликаторы от строительства и эксплуатации АЭС в России являются достаточно значимыми, что позволяет говорить о том, что затраты на развитие атомного комплекса являются продуктивными и формируют приемлемый уровень доходов.

¹ В данном случае используется классификация технологичности видов экономической деятельности, принятая ОЭСР.

Высокий уровень макроэкономических эффектов в атомном секторе, прежде всего, определяется наличием достаточно длинных производственных цепочек, включающих высокие переделы, в том числе и в части машиностроительной продукции при относительно низкой доли импорта в затратах.

Эффекты международных проектов в атомной энергетике

Отдельным и очень интересным вопросом является расщепление экономических эффектов при реализации международных проектов в области атомной энергетики. Такого рода оценки важны и для переговоров между странами, когда страна-партнер, на территории которой реализуется проект, может увидеть, как формируются эффекты и в какой степени расщепление доходов является выгодным для нее.

В случае международного проекта все оценки также делятся на две стадии: строительства и эксплуатации (рис. 6). Конечно, еще существует и третья стадия – вывод АЭС из эксплуатации, но, к сожалению, для нее пока не накоплен необходимый объем информации, который бы позволял четко оценивать эффекты.

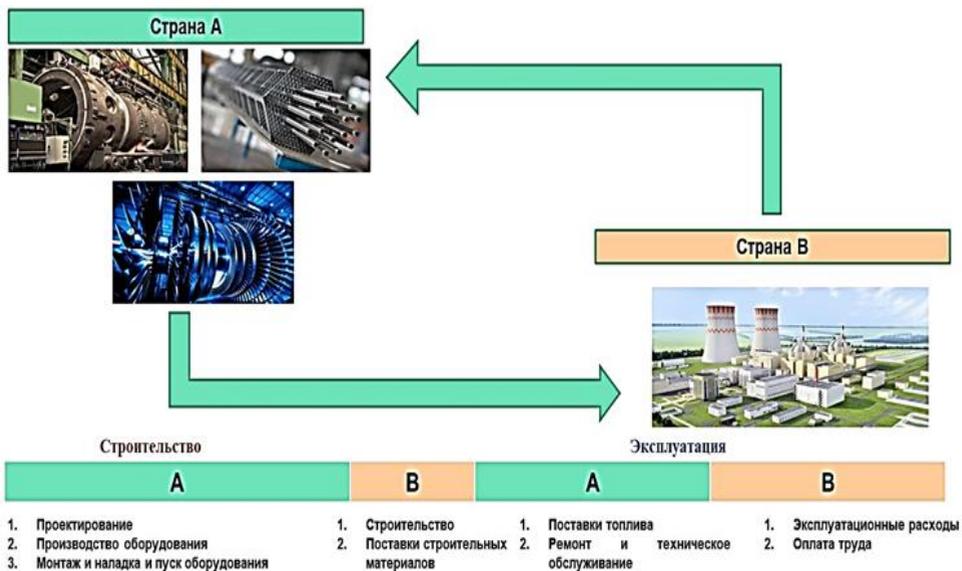


Рис. 6. Распределение затрат при реализации международных проектов по строительству объектов атомной энергетики

В рамках международного проекта, как правило, есть страна А, которая обладает технологиями в области атомной энергетики, и страна В, которая хочет использовать атомные энергетические технологии на своей территории. Соответственно, затраты на фазах строительства и эксплуатации распределяются между странами.

Страна А на этапе строительства осуществляет проектирование, поставку топлива и оборудования, пуско-наладочные и отдельные строительные работы. Страна В осуществляет строительные работы и поставляет строительные материалы. На стадии эксплуатации страна А осуществляет поставки топлива, а также ремонт и технологическое обслуживание оборудования. Страна В несет эксплуатационные расходы и оплату труда сотрудников АЭС.

На рис. 7 представлен некоторый условный пример строительства АЭС за рубежом, на основе которого можно увидеть примерное распределение эффектов. Видно, что для России наиболее существенную долю эффектов составляет производство машин и оборудования (22,2% из 100%), финансы и страхование (7,5%), производство электрооборудования (7,4%). Для страны-партнера это строительство (24,7% из 100%), производство машин и оборудования (18,1%), страхование (9,5%), транспорт (4,5%).



Рис. 7. Распределение эффектов при строительстве АЭС за рубежом для России и страны-партнера, условный пример

Важно отметить, что повышение доли капитальных затрат, локализованных в России, вызывает удорожание проекта строительства АЭС, но и формирует дополнительные макроэкономические эффекты на валовый выпуск, ВВП и доходы бюджета, которые, как правило, превышают объём дополнительных капитальных затрат в проекте.

Таким образом, одним из направлений увеличения макроэкономической эффективности реализации проектов строительства АЭС за рубежом является увеличение локализации работ, выполняемых российскими компаниями, прежде всего, за счет снижения использования товаров и услуг третьих стран.

И, наконец, нельзя обойти вниманием важность атомной энергетики в контексте борьбы с изменением климата. Проекты развития объектов атомной энергетики либо способствуют размену менее экологичных источников генерации энергии (углеводородных) на атомную энергию, либо удельные выбросы парниковых газов уменьшаются через включение атомного сектора в существующую структуру генерации электроэнергии.

По нашим оценкам, замещение преимущественно угольной генерации через введение в строй атомной электростанции мощностью в четыре блока типа ВВЭР-1200 снижает объем выбросов в CO₂ эквиваленте примерно на 26 млн т. в год, что можно признать достаточно существенной величиной даже для крупных стран мира.

Таким образом, в настоящее время атомная энергетика способствует не только экономическому, но и экологическому развитию, а значит, может рассматриваться как важный элемент достижения целей устойчивого развития.

Литература

1. Яременко Ю.В. Теория и методология исследования многоуровневой экономики. – М.: Наука, 1997. – 400 с.
2. Симонов Н.С. Военно-промышленный комплекс СССР в 1920–1950-е гг.: темпы экономического роста, структура, организация производства и управление. – АНО «Издательство «Политическая энциклопедия», 1996. – 345 с.
3. Miller R.E., Blair P.D. Input-output analysis. Foundations and extensions // 2nd edition – Cambridge: Cambridge University Press, 2009. – 784 p.
4. Макроэкономические эффекты развития атомной энергетики (методология и практические оценки): научный доклад. – М.: Издательский дом «Международные отношения», 2018. – 70 с.

Е.Т. Артемов¹

СОВЕТСКИЙ АТОМНЫЙ ПРОЕКТ В КООРДИНАТАХ «КОМАНДНОЙ ЭКОНОМИКИ»²

Советскому атомному проекту посвящено необъятное количество публикаций, например, обзор [13]. Практически все авторы соглашаются, что он сопровождался выдающимися прорывами в развитии науки, техники, производства. Справедливо отмечается, что для страны, понесшей огромные потери в недавно закончившейся войне, его осуществление стало настоящим подвигом [18, р. 192, 193].

Вместе с тем возникает вопрос: как советской экономике, отличавшейся, по утверждению многих, «непроизводительностью» (inefficient) и «фундаментальной безответственностью» (fundamental irresponsibility) [17, с. 104, 109], удалось добиться такого результата? Достаточно ли для этого одной мобилизации ресурсов, дополняемой активным копированием западных технологий? И внятного ответа на него пока нет.

В то же время можно отметить, что создание в кратчайшие сроки мощной атомной промышленности стало возможным благодаря двум предпосылкам: во-первых, наличию научно-производственной базы, способной освоить самые передовые для того времени технологий, и, во-вторых, специальная «настройка» институтов командной экономики, обеспечившая результативную организацию работы.

Прокомментируем эти утверждения.

Начну с мобилизационной стратегии.

Как известно, атомный проект был запущен во время войны. Но только после ее окончания создание ядерного оружия стало общегосударственным приоритетом. Причина заключалась во втягивании страны в холодную войну.

Огромным преимуществом в нараставшей конфронтации между бывшими союзниками по антигитлеровской коалиции располагали Соединенные Штаты Америки. Их неоспоримое превосходство в экономической мощи дополняла монополия на ядерное оружие. В случае

¹ Главный научный сотрудник Института истории и археологии УрО РАН, доктор исторических наук.

² По материалам доклада на заседании общего собрания ОИФН РАН.

прямого военного столкновения это угрожало обернуться для Советского Союза настоящей катастрофой.

Отсюда советское руководство сделало однозначный вывод: гарантировать безопасность страны может только обладание таким же оружием. С самого начала было понятно, что его создание – задача огромной сложности. Даже Соединенным Штатам, обладавшим гораздо большими производственно-техническими возможностями и сосредоточившим у себя цвет европейской научной и инженерной мысли, потребовалось напрячь все силы для ее решения.

С другой стороны, Советский Союз также располагал солидным научно-техническим и производственным потенциалом. Его основы были заложены в предвоенные годы, в ходе т.н. «сталинской индустриализации». Тогда в стране появилась разветвленная сеть исследовательских учреждений и мощная тяжелая промышленность, способная удовлетворять инвестиционные потребности экономики и запросы Вооружённых сил в боевой технике. Они смогли обеспечить Красную армию самыми современными средствами вооруженной борьбы во время Второй мировой войны. И это позволяло рассчитывать, что советская наука и промышленность справятся с задачей создания атомного оружия. Требовалось только надлежащим образом организовать работу, используя нестандартные подходы.

Прежде всего атомный проект получил неоспоримое преимущество в числе государственных дел. Неслучайно даже в официальных документах его стали именовать «задача № 1». Это сняло все ограничения при планировании и проведении работ. Были установлены «в порядке исключения» правила, согласно которым затраты на атомный проект не лимитировались, а запросы удовлетворялись «независимо от степени обеспечения ... других нужд народного хозяйства» [6, с. 207, 208]. Его заявки на материальные ресурсы автоматически включались Госпланом (затем Госснабом СССР) в общесоюзные балансы распределения металлов, топлива, электроэнергии, оборудования, химикатов, строительных материалов и т. д.

Заказы «смежникам» на их поставку оформлялись в виде особых нарядов с так называемой красной полосой. Те, кому они адресовались, прекрасно знали об огромной ответственности в случае невыполнения заданий. Так была снята проблема дефицита, считающаяся «ахиллесовой пятой» командной экономики.

Строительство атомных объектов разрешалось начинать без утвержденных проектов и смет и вести «по единичным расценкам». Финансирование работ устанавливалось по «фактической потребности». Минфин лишь уведомляли, сколько денег на эти цели он должен резервировать в госбюджете. Для непосредственных исполнителей заданий в Госбанке СССР была открыта специальная кредитная линия, позволявшая им беспрепятственно пополнять оборотные средства. Затем выданные кредиты погашались за счёт госбюджета.

Генеральным подрядчиком при строительстве атомных объектов выступал Главпромстрой МВД, располагавший неограниченными возможностями для привлечения подневольной рабочей силы. Кадровая проблема основного производства решалась путем массовых мобилизаций «лучших работников», отбираемых по всей стране. Такие правила ставили атомный проект в исключительное положение. Однако это не означало, что на затраты вовсе не обращали внимание. После «разоблачения» и ареста Л.П. Берия, главного администратора проекта, даже обвинили во «вредительской» экономии средств [3, с. 158, 159].

Работа в атомном проекте строилась в соответствии с программно-целевым подходом. Правда, единого документа, в котором бы формулировались его цели и задачи, определялось содержание и сроки выполнения отдельных этапов, приводились расчеты потребных ресурсов и т. д., не существовало. Но отсутствие официальной «дорожной карты» не отменяло главного: ориентация на конечный результат прослеживалась даже в ситуативно принимавшихся решениях.

Проектный принцип управления позволял оптимизировать взаимодействие многочисленных промышленных предприятий, исследовательских, конструкторских и проектных организаций различной ведомственной принадлежности. Это было особенно важно в связи с растущим размахом работ.

Уже в начале 1950-х гг. на предприятиях и в организациях атомной отрасли было занято 145 тыс. человек. Ей выделялось до 4% общего объема капитальных вложений по всем министерствам и ведомствам. Еще 190 тыс. работало на урановых рудниках и обогатительных фабриках в ГДР, Чехословакии, Болгарии, Польше, которые на 80% обеспечивали атомный

проект ураносодержащим сырьем. Их создание и деятельность в основном финансировались за счёт советской стороны.

Но это были еще не все затраты. Значительная часть средств проходила по сметам министерств-«смежников» и предназначалась для развития обеспечивающих производств. Доступные данные не позволяют оценить их масштабы. Но ясно одно: количество занятых в организациях-«соисполнителях» исчислялась сотнями тысяч. Только в Главпромстрое МВД насчитывалось 260 тыс. заключенных, военных строителей и «вольнонаемного контингента» (в основном – бывших заключенных) [1, с. 98, 263].

Для руководства атомным проектом создали независимую управленческую вертикаль. На самом ее верху находился Специальный комитет при Совете министров СССР во главе с Л.П. Берией. Это был директивный орган, подотчётный только И.В. Сталину. Никакие партийно-правительственные инстанции не имели права вмешиваться в его дела. Сам же Спецкомитет мог давать (в рамках своей компетенции) поручения любым управленческим структурам. Его независимости от других субъектов госуправления способствовал жесткий режим секретности.

Общую картину и масштабы курируемых Спецкомитетом работ представляли лишь И.В. Сталин и Л.П. Берия. К числу «осведомленных» принадлежало еще несколько человек из числа администраторов и научных лидеров атомного проекта – Б.Л. Ванников, А.П. Завенягин, И.В. Курчатov. В.А. Махнев, М.Г. Первухин. Все остальные партийно-правительственные «иерархи», руководители привлекаемых министерств и ведомств обладали ограниченной, фрагментарной информацией, непосредственно их касающейся.

Такой порядок, с одной стороны, упрощал процедуру принятия решения, а с другой – возлагал на членов Спецкомитета всю ответственность за результаты работы.

На заседаниях Спецкомитета рассматривались самые разнообразные вопросы: от утверждения сводных плановых заданий и отчетов до оказания адресной помощи конкретным предприятиям и организациям. Много внимания уделялось строительству объектов, материально-техническому, финансовому и кадровому обеспечению работ, привлечению «смежников», соблюдению должного уровня секретности и безопасности. Периодически обсуждались научно-технические проблемы создания и испытания ядерного

оружия, налаживания серийного производства «изделий», организации их хранения и подготовке к боевому использованию и т.д. Решения Спецкомитета оформлялись в виде постановлений и распоряжений Совета министров, которые подписывал И.В. Сталин. Но в оперативное управление атомным проектом он практически не вмешивался. Да это было и невозможно делать.

Только с сентября 1945 г. по август 1949 г. Совет министров принял свыше тысячи постановлений, связанных с реализацией атомного проекта [7, с. 97]. Детально вникать в содержание каждого руководитель государства, обремененный множеством других забот, просто физически не мог. Поэтому подготовленные документы И.В. Сталин, как правило, утверждал «списком». Однако в принципиальных вопросах – сроках создания и испытания «изделий», масштабах серийного производства ядерных боеприпасов, определении перспективных направлений работы – последнее слово оставалось за вождем.

Решения Спецкомитета готовили его штабные структуры – Технический (Научно-технический) совет и секретариат, первое управление Госплана СССР (Управление по планированию и контролю специальных работ Спецкомитета), Ученый совет при президенте АН СССР.

Особое место в аппарате Спецкомитета занимали подразделения, связанные с силовыми органами. Так называемое Бюро № 2 занималось организацией «атомного шпионажа», переводом и первичным анализом разведматериалов, а специальная группа координировала деятельность уполномоченных Совета министров СССР. Они назначались из числа офицеров и генералов госбезопасности и подчинялись лично Л.П. Берии. Уполномоченные контролировали «неукоснительное» выполнение заданий Спецкомитета. В случае каких-либо «сбоев» и «неувязок» они имели право инициировать санкции в отношении «виновных» руководителей [2, с. 127–136]. Так управленческие и надзорные функции в атомном проекте оказались сосредоточены в одних руках, чего в советской практике хозяйствования ни прежде, ни позже не наблюдалось.

Практической реализацией решений Спецкомитета занималось Первое главное управление (ПГУ) при Совете министров СССР. Его создание положило начало формированию атомной отрасли. В качестве исполнительного органа атомного проекта ПГУ выполняло функции

заказчика, разработчика, производителя, приемщика и «хранителя» «готовых изделий» (ядерного оружия).

Такое экстраординарное совмещение компетенций в одной управленской структуре ввели не случайно. Оно исключало вмешательство в дела атомного проекта любых «внешних» инстанций. И только в конце 1950-х гг. обязанности заказчика, а также функции хранения и подготовки ядерных боеприпасов к боевому применению перешли от Министерства среднего машиностроения (правопреемника ПГУ) к Министерству обороны.

По своему статусу Первое главное управление приравнивалось к союзному министерству. Ему непосредственно подчинялись предприятия и организации, занимавшиеся добычей и переработкой урановых руд, производством «ядерной взрывчатки» (делящихся материалов), разработкой и серийным выпуском «изделий», изготовлением отдельных видов горнорудного и химико-технологического оборудования.

Одновременно ПГУ координировало и контролировало действия министерств и ведомств, привлеченных к выполнению «научно-исследовательских, проектных, конструкторских и практических работ по использованию атомной энергии» [6, с. 197–201]. По мере их развертывания число «внешних» исполнителей стремительно росло. Уже на момент испытания первой советской атомной бомбы в 1949 г. в выполнении заданий атомного проекта участвовало свыше 80 предприятий 16 министерств и ведомств. А в решении его «основных научно-технических вопросов» было задействовано более 70 академических и отраслевых исследовательских институтов, конструкторских бюро и проектных организаций [6, с. 172–171, 719–741].

Ведомственные барьеры и разнородная специализация «соисполнителей» серьезно затрудняли организацию их слаженного взаимодействия с атомной отраслью. Но огромный административный ресурс, находившийся в распоряжении Спецкомитета и Первого главного управления, заметно облегчал решение этой задачи.

Свою роль играл и человеческий фактор: на руководящие должности в ПГУ назначались авторитетные организаторы производства. Часть из них – А.П. Завенягин, Н.А. Борисов, М.Г. Первухин, А.Н. Комаровский и др. – исполняли свои обязанности по совместительству. Таким образом, устанавливалась персональная связь с ведомствами, взаимодействие с

которыми имело для ПГУ критическое значение. В результате издержки, связанные с привлечением «смежников», оказались для атомного проекта меньше, чем если бы пришлось развертывать весь спектр необходимых производств в составе Первого главного управления.

Вначале работа в атомном проекте направлялась отдельными решениями Спецкомитета, затем ее перевели «на плановые рельсы». Но это ничего принципиально не изменило. Квартальные и годовые планы по сути являлись «декларациями о намерениях». Они ни с кем не согласовывались и постоянно пересматривались в связи «со вновь открывшимися обстоятельствами». Это позволяло оперативно реагировать на постоянно возникавшие проблемы и расширяло поле для маневра ресурсами. Однако для непосредственных исполнителей перманентные изменения производственной программы создавали серьезные трудности. Но их возражения в расчет, как правило, не принимались.

Другими словами, оперативное руководство работами де-факто осуществлялось не «в плановом порядке», а в «ручном режиме». Вместе с тем долгосрочные проектировки пересмотру не подлежали. Так после испытания в августе 1949 г. опытного ядерного заряда И.В. Сталин, по представлению Спецкомитета, утвердил пятилетний план развития атомной промышленности. Его целевая установка заключалась в выпуске максимального количества ядерных боезарядов. Определялась и конкретная цифра: «153 готовых изделия из плутония». И это задание было выполнено точно в установленном объеме.

К концу «атомной пятилетки» в 1954 г. Советский Союз уже располагал 150 атомными бомбами. Правда, в их число входили «изделия», изготовленные по так называемой композитной схеме (плутоний вместе с ураном-235), что ускорило достижение намеченного результата [1, с. 132, 133]. И все же его совпадение с утвержденным плановым заданием являлось редким исключением в советской практике. Но на атомный проект работала вся страна, так что даже невозможное становилось возможным.

Важную роль в своевременном и качественном выполнении планов играло «конструктивное соперничество» непосредственных исполнителей. Оно заключалось в привлечении к выполнению одних и тех же работ сразу нескольких предприятий и организаций. Официально подобная практика, именуемая дублированием, осуждалась. Но в атомном проекте на нее пошли сознательно. В результате появилась конкурентная среда, побуждавшая

исполнителей по максимуму использовать свои возможности. «Параллелизм» в организации работы стал использоваться уже на стадии запуска атомного проекта.

Ключевой проблемой тогда являлось налаживание выпуска плутония и оружейного урана. Было известно, что в Соединенных Штатах для их наработки использовались различные технологии. По такому же пути решили пойти и в Советском Союзе: запланировали построить сразу три комбината. Один предназначался для производства плутония-239 в уран-графитовых и тяжеловодных реакторах. Другой – для получения урана-235 методом диффузионного разделения изотопов природного урана. На третьем – планировалось применить электромагнитный способ обогащения урана.

Стоимость возведения комбинатов на момент принятия соответствующего решения оценивалась приблизительно одинаково. Но ясности о реальных эксплуатационных издержках и технологичности их производства не было. Это предполагалось выяснить по ходу дела, после ввода комбинатов в строй.

Так, собственно, и произошло. Поскольку электромагнитный способ обогащения урана оказался чрезвычайно затратным, комбинат использовавший данную технологию, «ликвидировали», передав здания, сооружения и оборудование вновь организованному заводу по серийному производству ядерных боеприпасов. Два других комбината доказали свою эффективность.

Поэтому было принято решение о строительстве еще ряда аналогичных предприятий.

При создании ядерных боеприпасов также широко использовались элементы конкуренции. Работа над первой атомной бомбой сначала шла по двум конструктивным схемам – с плутониевой и с урановой начинкой. Когда же выяснилось, что последний вариант менее эффективен, от него отказались [7, с. 95, 98, 101].

Аналогичный подход, предусматривавший соперничество различных проектов, был реализован и при создании термоядерного заряда [8, с. 248–250]. До середины 1950-х гг. конструированием ядерного оружия занималось только КБ-11 (ныне ВНИИ экспериментальной физики, г. Саров). Затем организовали еще один ядерный-оружейный центр – НИИ-1011 (сегодня ВНИИ технической физики, г. Снежинск).

По официальной версии, это было сделано для повышения устойчивости процесса создания критически важного средства вооруженной борьбы в случае прямого военного столкновения с «вероятным противником». Однако по свидетельству одного из ведущих разработчиков ядерного оружия академика Е.Н. Аврорина, главная причина заключалась в стимулировании соревновательности между организациями, чтобы «старый кот (КБ-11 – Е. А.) не дремал» [11, с. 52].

Похожий порядок применялся при организации работы «смежников». Как это происходило на практике хорошо иллюстрирует пример производства диффузионных машин, предназначенных для обогащения урана. Их конструирование и выпуск поручили двум «флагманам» советской индустрии: Горьковскому (артиллерийскому) заводу № 92 Министерства вооружения и ленинградскому Кировскому заводу Министерства транспортного машиностроения. К концу 1946 г. они изготовили по 20 машин собственной конструкции. В ходе испытания явное превосходство и по стоимости и по эффективности показали Горьковские образцы, поэтому ПГУ решило оснастить первую очередь комбината № 813 (по газодиффузионному обогащению урана) только ими.

Но Кировскому заводу дали второй шанс – сменили руководство конструкторских подразделений и провели их масштабную реорганизацию. Очередные испытания показали преимущество уже ленинградской техники. В результате вторую очередь комбината № 813 укомплектовали только машинами Кировского завода. За этим последовали ожидаемые «оргвыводы». Директор, он же главный конструктор Горьковского завода, лишился своих постов. А Министерство вооружения было вынуждено срочно провести техническое перевооружение и «укрепить» кадровый состав конструкторской базы предприятия. И вскоре оно смогло предложить новые, усовершенствованные образцы важнейшего оборудования.

Таким образом, в течение 1946–1952 гг. было разработано свыше 40 конструкций диффузионных машин, из которых 17 (9 производства Кировского завода и 8 – Горьковского) запустили в серию [15, с. 79–83; 5, с. 38, 39].

Похожая картина наблюдалась при создании реакторов, высокочастотных индукционных вакуумных печей, прецизионных измерительных приборов и т.д.

В каждом конкретном случае организация работы на конкурсной основе имела свою специфику. Но было и много общего. Прежде всего, привлекаемые к ней производственные и научно-технические структуры не могли отказаться от «высокого доверия». Однако условия выполнения спускаемых «сверху» заданий обсуждались. Потенциальным исполнителям не возбранялось «торговаться», требовать расширения производственных мощностей «своих» предприятий, выделения им дополнительных лимитов на материально-техническое снабжение и увеличения штатной численности персонала и т. д. Одновременно оговаривались «ударные» схемы оплаты труда, меры по расширению закрепленного за коллективами жилого фонда и обеспечению работников дефицитными промышленными и продовольственными товарами.

В любом случае задания выдавались под личную ответственность руководителей предприятий, организаций и направлений работ, с которых спрашивали «по полной программе». Так соперничество производственных и научно-технических структур трансформировалось в конкуренцию администраторов с ее «искусственным отбором».

Принятая организация работы предъявляла особые требования к кадровому составу атомного проекта. Поэтому к его формированию Спецкомитет подходил очень тщательно.

Первоочередное внимание уделялось подбору руководящих работников и ведущих специалистов. Но если ученых ещё старались убедить принять предложение, обещая «все возможности для научной работы» и «лучшие материальные условия» [14, с. 147], то с администраторами не церемонились. Их просто уведомляли о мобилизации, не оставляя шанса отказаться. Когда будущий министр среднего машиностроения Е.П. Славский попытался оспорить свой перевод в ПГУ, заместитель председателя Совмина СССР А.И. Микоян задал риторический вопрос: «Кто пойдет к товарищу Сталину, чтобы он отменил решение?» Заняв руководящую должность в ПГУ сам Славский действовал аналогичным образом. Пытавшемуся освободиться от мобилизации он мог сказать: «Работать все равно будешь. Под конвоем водить будем».

Нежелание многих переходить на работу в структуры атомного проекта было вполне объяснимо. Кандидаты на ответственные должности в общем представляли с чем им придется столкнуться. Конкуренция администраторов не позволяла никому расслабляться. Даже отсутствие видимых сбоев ещё не

гарантировало стабильного положения. При этом «выйти из игры» по собственной инициативе было практически невозможно. Для ответственного работника это, в лучшем случае, означало конец профессиональной карьеры. Как говорилось: «Вход – рубль, выход – два» [4, с. 877].

При отборе рядового инженерного и научно-технического персонала, управленцев среднего и низшего звена, рабочих основного производства также использовался индивидуальный подход. Однако с учетом массовости «контингента» он осуществлялся в несколько этапов. Сначала Секретариат ЦК ВКП(б) по поручению Спецкомитета устанавливал разрядку различным министерствам и ведомствам, областным комитетам партии – сколько и каких работников нужно откомандировать в распоряжение ПГУ. Подчёркивалось, что отбирать нужно квалифицированных и дисциплинированных людей, не имеющих в своей биографии каких-либо изъянов. За это рекомендуемые несли персональную ответственность. На следующем этапе намеченные кандидаты тщательно проверялись органами госбезопасности. Затем в дело вступали кадровые службы ПГУ. И только после одобрения последними отобранных работников направляли на предприятия атомной отрасли. Разумеется, что их согласия никто не спрашивал.

Специфическую категорию работников составляли заключенные. По преимуществу они были заняты на возведении атомных объектов. Это являлось осознанным решением. Строительство в основном велось за пределами крупных городов. Там не было необходимой материально-технической базы, ни нужной рабочей силы. В таких условиях быстрее всего могли развернуть работы мобильные коллективы, укомплектованные «спецконтингентом». Они легко перебрасывались на новое место и не нуждались в особых затратах на обустройство. Сначала на долю заключенных приходилось свыше половины строителей. Затем, в конце 1940-х гг., когда работы были развернуты, приняли решение о постепенной замене «спецконтингента» военнослужащими и вольнонаемным персоналом как более мотивированными к производительному труду.

Однако принципиально ситуация изменилась лишь после «бериевской амнистии», последовавшей за смертью Сталина. С того времени основным источником рабочей силы, задействованной на возведении атомных объектов, стали военно-строительные части. Но даже в 1970 г. на стройках Минсредмаша еще работало свыше 27 тыс. заключённых [9, с. 815].

«Штучный» отбор работников для формирующейся атомной отрасли позволил укомплектовать ее квалифицированными кадрами. Но их еще нужно было побудить много и интенсивно работать. Эту проблему решила продуманная система мотивации труда. Она сочетала стандартные для сталинской эпохи методы материального стимулирования и морального поощрения, воспитания и принуждения, убеждения и насилия.

Специфика заключалась в снятии всех ограничений как в вознаграждении «отличившихся», так и в наказании «нерадивых». Всем занятым в атомном проекте были установлены «ударные нормы» оплаты труда. В первую очередь это относилось к его ключевым фигурам: ведущим специалистам, руководителям предприятий и организаций, высшему административному составу. Они имели высокие оклады и специальные надбавки за интенсивность работы. Регулярно выплачиваемые им премии могли в десятки, а то и сотни раз превышать среднемесячную зарплату по народному хозяйству.

Важную роль в мотивации труда играла убежденность участников атомного проекта в значимости их дела для судеб страны. К этому добавлялось стремление к самореализации, желание добиться успеха в профессиональном и карьерном росте.

Вопреки распространённому мнению, уголовное преследование за «ненадлежащее» исполнение заданий носило ограниченный характер. Но даже высшие хозяйственные руководители не чувствовали себя защищенными при каких-либо сбоях. Реальность подобной угрозы подтверждали случаи демонстрационного наказания «провинившихся».

Так в конце 1940-х гг. Министерство геологии СССР «сорвало» планы увеличения промышленных запасов урановых руд. В результате министра и его первого заместителя обвинили в «политических и организационных ошибках» и освободили от занимаемых постов. Ряд других руководящих работников и ведущих специалистов отрасли, якобы «преднамеренно...направлявших разведки по ложному пути», отдали под суд. Но такие единичные случаи в большей мере были предназначены для убеждения всех и каждого в жизненной необходимости выполнения установленных заданий и поддержания высокого уровня исполнительской дисциплины. Как правило, для устранения выявленных «сбоев» и «недочетов» в работе хватало вызова на ковер [4, с. 874, 875].

Наиболее последовательно нестандартные подходы к организации работы использовались до ликвидации Спецкомитета и ареста Л.П. Берии в июне 1953 г.

Благодаря им удалось решить главную задачу атомного проекта — создать и вывести на устойчивую траекторию развития научно-производственный сектор ядерно-оружейного комплекса. Это позволило осуществить поступательное наращивание советской военной мощи. В год смерти Сталина СССР уже имел в своем арсенале 120 ядерных боезарядов, а в конце 1950-х гг. их число превысило 1 000 единиц [16, с. 199]. Они были обеспечены необходимыми средствами доставки, боевого управления и развитой инфраструктурой для испытания, хранения и подготовки «изделий» к применению. Это закрепило за Советским Союзом статус мировой сверхдержавы.

С другой стороны, реализация атомного проекта дала мощный импульс развитию ряда наукоемких производств и перспективных направлений фундаментальных исследований, наличие которых до сих пор обеспечивает России важные конкурентные преимущества [10, с. 530–532].

Конечно, чтобы добиться такого результата пришлось пойти на огромные затраты. Но использовались они вполне рационально. По имеющимся оценкам расходы на американскую атомную программу в 1941–1950 гг. и на советский атомный проект в 1945–1953 гг. были при сопоставимых достижениях примерно одинаковы [12, с. 327]. И это вполне правдоподобно. Во-первых, опора на начальном этапе на зарубежный опыт значительно сократила расходы на овладение ядерными технологиями. Во-вторых, использование принудительного труда позволило заметно сэкономить на строительстве атомных объектов. В-третьих, оплата труда американских рабочих и специалистов – при сопоставимой производительности — заметно превышала зарплату их советских коллег. А поскольку она составляла до трети производственных затрат, то вывод очевиден. В-четвертых, проектное управление работами обеспечивало слаженное взаимодействие всех исполнителей. И, в-пятых, что, пожалуй, самое главное, предельная централизация власти, прагматизм и политическая воля высшего руководства, конкуренция администраторов, профессионализм и ответственное отношение работников позволили оптимизировать затраты и результаты.

Конечно, при подобных сравнениях нужно учитывать разные возможности стран. В то время национальный доход Соединённых Штатов в 4–5 раз превосходил аналогичный показатель СССР. Следовательно, нагрузка на советскую экономику была во столько же раз больше. Поэтому, чтобы добиться желаемого результата, Советскому Союзу приходилось экономить практически на всем.

Сказанное объясняет, почему опыт атомного проекта не нашел широкого применения. Экономика страны просто не выдержала бы расширения числа «особых зон». Даже при создании ракетной техники и систем радиоэлектронного вооружения, также находившихся в ведении Спецкомитета, действовавшие в атомном проекте правила применялись лишь выборочно.

Литература

1. Артемов Е.Т. Атомный проект в координатах сталинской экономики. М.: Политическая энциклопедия, 2017. 343 с.
2. Артемов Е.Т. Органы госбезопасности в советском атомном проекте: функции и вклад в реализацию // Уральский исторический вестник. 2019. № 1 (62). С. 129–136.
3. Артемов Е.Т. Мобилизация и конкуренция в советском атомном проекте // ЭКО. Всероссийский экономический журнал. 2019. Т. 49. № 7. С. 156–172.
4. Артемов Е.Т. Слагаемые успеха советского атомного проекта // Вестник Российской академии наук. 2020. Т. 90, № 9. С. 870–881.
5. Артемов Е.Т., Бедель А.Э. Укрощение урана. Екатеринбург: СВ-96, 1999. – 352 с.
6. Атомный проект СССР. Документы и материалы: в 3 т. Т. 2: Атомная бомба. 1945–1954. Кн. 2. М.: Наука: Физматлит; Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2000. – 640 с.
7. Гончаров Г.А., Рябев Л.Д. О создании первой отечественной атомной бомбы // Успехи физических наук. 2001. № 1. С. 79–104.
8. Гончаров Г.А. Необычайный по красоте физический принцип конструирования термоядерных зарядов // Успехи физических наук. 2005. Т. 175. № 11. С. 1243–1252.
9. Дерябин И.Е., Жуманов Р.А. Строительная индустрия Минатома России // Ядерная индустрия России. – М.: Энергоатомиздат, 1999. С. 810–871.
10. Ильяев Р.И. Основные этапы атомного проекта // Успехи физических наук. 2013. Т. 183. № 5.
11. Имамутдинов И. Просто очень интересная наука // Эксперт. 2013. № 14. С. 50–54.

12. Котельников Р.Б., Тумбаков В.А. Атомный проект СССР – дерево целей, ресурсы, усилия, результаты (1945–1959 гг.) // Наука и общество: история советского атомного проекта (1940–1950 гг.): тр. междунар. симпоз. ИСАП-96. М.:ИздАТ, 1999. С. 320–330.

13. Мельникова Н.В., Джозефсон П. Американские и российские исследования истории атомного проекта СССР: сравнительный анализ // Вопросы истории естествознания и техники. 2016. Т. 37. № 1. С. 85–109.

14. Сахаров А.Д. Воспоминания 1921–1971: так сложилась жизнь. М.: КоЛибри, 2016. 544 с.

15. Синев Н.М. Обогащенный уран для атомного оружия и энергетики: к истории создания в СССР промышленной технологии и производства высокообогащенного урана. М.: ЦНИИАтоминформ, 1991. – 138 с.

16. Харитон Ю.Б., Бриш А.А. Ядерное вооружение // Вооружение России: в 2 т. – М.: ИД Оружие и технологии, 2010. Т. 1. Советская военная мощь. С. 162–203.

17. Эриксон Р. Командная экономика и ее наследие // Экономика России. Оксфордский сборник. – М.: Изд-во Института Гайдара, 2015. Кн. 1. С. 101–165.

18. Holloway D. Stalin and the Bomb: the Soviet Union and the Atomic Energy. 1939–1956. New Haven; London: Yale univ. press, 1994. – 464 p.

**Постановление Общего собрания
членов Российской академии наук от 8.12.2020 г. № 35
«О научной сессии общего собрания членов РАН
«75-летие атомной промышленности. Вклад Академии наук.
Результаты и перспективы сотрудничества РАН
и Госкорпорации «Росатом»**

Создание 20 августа 1945 г. Специального комитета при Государственном комитете обороны СССР для руководства работами по атомному проекту и Первого Главного управления при Совете народных комиссаров СССР стало рождением отечественной атомной отрасли. Реализация советского «атомного проекта» позволила в короткие сроки обеспечить создание «ядерного щита» страны, достичь ядерного паритета с США, сохранив мир на планете.

Общепризнан вклад Академии наук в становление и развитие атомной отрасли. Трудно переоценить роль Академии наук в инициировании и реализации атомного проекта как государственной программы. Эпохальные достижения нашей страны по реализации атомного проекта обусловлены исключительно высокой эффективностью Академии наук, интеллектуальная мощь которой определялась входившими в ее состав академическими институтами и лабораториями. Академия наук и лидеры академической науки создали необходимые научные, кадровые, институциональные предпосылки для развертывания атомного проекта в стране. В разветвленной организационной структуре советского атомного проекта институты и лаборатории Академии наук занимали ключевые позиции, отвечая за его научное обеспечение. Созданный одновременно с развертыванием работ научный центр проекта – Лаборатория 2 (в настоящее время НИЦ «Курчатовский институт»), был академическим учреждением.

Из девяти участников атомного проекта, трижды удостоенных звания Герой Социалистического Труда, восемь являлись членами Академии наук СССР (И.В. Курчатов, Ю.Б. Харитон, А.П. Александров, М.В. Келдыш, Н.Л. Духов, Я.Б. Зельдович, А.Д. Сахаров, К.И. Щелкин). Девять членов Академии наук, участвовавших в атомном проекте, были удостоены этого высокого звания дважды, а 51 ученый – член Академии наук, участвовавший в атомном проекте и в развитии атомной отрасли, удостоен звания Героя Социалистического Труда и Героя труда Российской Федерации. Девять академиков – участников атомного проекта стали лауреатами Нобелевской премии (В.Л. Гинзбург, Л.Д. Ландау, П.Л. Капица, Н.Н. Семенов, И.Е. Тамм, П.А. Черенков, И.М. Франк, А.Д. Сахаров, Л.В. Канторович).

Славная традиция тесного взаимодействия Академии наук и атомной отрасли продолжалась в последующие годы и продолжается в настоящее время. В феврале 2019 г. было подписано Соглашение о сотрудничестве РАН и Госкорпорации «Росатом» «Об использовании потенциала Российской академии наук в решении стратегических задач Госкорпорации «Росатом». Целью сотрудничества является совершенствование координации совместной деятельности при планировании и выполнении фундаментальных, поисковых и прикладных научных исследований в интересах развития атомной отрасли. Такое сотрудничество направлено на организацию совместной научной, научно-технической и инновационной деятельности, организацию обмена научно-техническими результатами, обеспечение стратегического планирования, проведение экспертизы научно-технических проектов и научных консультаций, взаимное привлечение ведущих ученых и специалистов для участия в работе научных и научно-технических советов. Важная роль в этом Соглашении отводится сохранению и развитию научных школ, формированию научной и инновационной инфраструктуры, а также развитию международного научно-технического сотрудничества.

В рамках данного Соглашения РАН и Госкорпорация «Росатом» осуществляют взаимодействие и координацию совместных действий по следующим направлениям:

- организация научных исследований, направленных на обеспечение технологического преимущества в отраслях отечественной промышленности, а также на снижение зависимости российских промышленных предприятий от импорта изделий, материалов, сырья и технологий;

- организация исследований и разработок, направленных на обеспечение в ближайшей перспективе формирования и опережающего развития новых высокотехнологичных отраслей атомной промышленности;

- создание и развитие научных центров мирового уровня и научно-образовательных центров с участием научных организаций, входящих в Госкорпорацию «Росатом», и научных организаций, находящихся под научно-методическим руководством РАН;

- разработка документов стратегического планирования;

- совершенствование нормативно-правовой базы научно-технической сферы;

- взаимодействие в развитии подготовки научных и научно-педагогических кадров, обеспечении условий для сохранения и развития научных школ, привлечении молодых и квалифицированных специалистов;

- участие в организации разработки, создании новых и модернизации

существующих экспериментальных комплексов класса «мега-сайенс» и организации на их базе масштабных исследовательских проектов; содействие формированию инновационной инфраструктуры и др.

Научно-организационную работу по этим направлениям научно-технического сотрудничества ведет созданная Рабочая группа (сопредседатели академики РАН Бондур В.Г. и Рыкованов Г.Н.).

Значимую роль в формировании научно-технической политики Госкорпорации «Росатом», организации и проведении научно-технической экспертизы для обеспечения устойчивого роста атомного энергетического комплекса, повышения ядерной и радиационной безопасности, развития фундаментальных и прикладных исследований, а также технологических разработок на основе применения ядерных процессов играет Научно-технический совет Госкорпорации «Росатом» (председатель академик РАН Рыкованов Г.Н.), который является постоянно действующим консультативным и совещательным органом. В его состав входит ряд членов РАН. Активно работает созданный еще в 1957 году Межведомственный научный совет по радиохимии при президиуме РАН и Госкорпорации «Росатом» (председатель академик РАН Мясоедов Б.Ф.), в который входят представители РАН и Госкорпорации «Росатом».

Инновационное развитие атомной отрасли обеспечивается исследованиями в таких направлениях, как ядерная физика, физика плазмы, квантовая оптика, физика лазеров, физика пучков заряженных частиц и ускорителей, гидродинамика, термодинамика, радиохимия, радиогеология, акустика, материаловедение и многих других. Результаты научных исследований ученых в этих направлениях являются основой сохранения технологического лидерства атомной промышленности в настоящее время и в будущем.

Сегодня атомная отрасль обеспечивает надежность и безопасность ядерного арсенала России, снабжает энергией города, промышленность, способствует развитию науки и обеспечивает разработку новых технологий не только по ядерным направлениям. И здесь сотрудничество РАН и Росатома трудно переоценить. Этому способствуют созданные «цепочки» из ученых и заказчиков, что позволяет большинству научно-исследовательских институтов Росатома, располагающих собственным опытным производством, воплотить научные замыслы ученых, начиная с результатов фундаментальных, поисковых и прикладных исследований и заканчивая конструкторскими разработками и созданием опытных образцов изделий.

Благодаря использованию достижений современной науки, Госкорпорация «Росатом» не только сохранила, но и развила традиции Министерства среднего машиностроения СССР. В связи с этим Россия стала мировым лидером в развитии реакторов на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем, а также единственной страной в мире, которая в течение многих лет промышленно эксплуатирует реакторы этого типа большой мощности (БН-600 и БН-800 на Белоярской АЭС) и разрабатывает проект коммерческого энергоблока большой мощности БН-1200М. В настоящее время наша страна вышла в лидеры также по темпам строительства новых безопасных атомных энергоблоков. В состав энергосистемы страны уже вошли три атомных энергоблока на базе реакторов поколения 3+. В ближайшее время начнут работать второй энергоблок Ленинградской АЭС-2 и первый энергоблок Белорусской АЭС.

Это позволяет России иметь высокую степень технологической готовности к обеспечению инновационного развития ядерной энергетики.

Основными актуальными задачами в настоящее время являются: решение системных проблем нынешней ядерной энергетики, сокращение накопления отработанного ядерного топлива, кардинальное повышение эффективности использования урана и снижение объемов радиоактивных отходов. В связи с этим учеными РАН и Госкорпорации «Росатом» ведутся совместные работы по замыканию ядерного цикла для полного использования энергетического потенциала уранового сырья и обеспечению более высокого уровня безопасности новых АЭС (по сравнению с ныне действующими). Результаты таких работ обеспечат переход на двухкомпонентную ядерную энергетику на основе замкнутого ядерного топливного цикла с реакторами на быстрых и тепловых нейтронах. Это снимет проблему топливных ресурсов ядерной энергетики за счет использования урана-238, увеличивая их практически используемую базу примерно в 150 раз и выводя ядерную энергетику на приоритетную позицию в общем энергобалансе ресурсов Российской Федерации, что будет способствовать улучшению экономических показателей ядерной энергетики и повышению конкурентоспособности на энергетическом рынке, превращая ее в ключевой элемент экологически чистой «зеленой» генерации.

Активно развивается атомный флот страны на базе новых корабельных и судовых реакторных установок четвертого поколения. Современные универсальные атомные ледоколы с реакторными установками РИТМ-200 серийно строятся на предприятиях Госкорпорации «Росатом». Началось строительство сверхмощного ледокола «ЛИДЕР» с реакторной установкой

РИТМ-400. Это обеспечит круглогодичные ледокольные проводки судов по Северному морскому пути в замерзающие порты России, аварийно-спасательные операции во льдах Арктики и в акваториях неарктических замерзающих морей, а также проведение высокоширотных научно-исследовательских экспедиций с активным участием членов РАН и сотрудников научных организаций, находящихся под научно-методическим руководством РАН.

Ученые РАН и Госкорпорации «Росатом» активно участвуют в ряде международных исследовательских проектов, в частности, в реализуемом по инициативе России международном проекте по созданию термоядерного экспериментального реактора – ИТЭР, за основу которого приняты российские установки «Токамак». Совместными усилиями создаются научные установки мегакласса, разрабатываются новые технологии и материалы, ведутся разработки по повышению радиационной стойкости космических аппаратов, квантовых компьютеров и алгоритмов, цифровых инструментов и программных кодов для проектирования атомной техники и повышения безопасности АЭС, поиску новых методов ядерной медицины.

В настоящее время с участием РАН подготовлена, согласована Координационным советом по приоритетам научно-технологического развития Российской Федерации, возглавляемым президентом РАН академиком РАН Сергеевым А.М., одобрена Президиумом Совета при Президенте Российской Федерации по науке и образованию и направлена для утверждения в Правительство Российской Федерации комплексная научно-техническая программа полного инновационного цикла «Новые композитные материалы: технологии конструирования и производства». Завершается подготовка комплексного научно-технического проекта полного инновационного цикла «Робототехнические технологии вывода объектов атомной энергетики из эксплуатации». Комплексная программа и комплексный проект полного инновационного цикла реализуют эффективную «цепочку» от фундаментальных, поисковых и прикладных исследований, проводимых учеными, прежде всего членами РАН, и сотрудниками научных организаций, находящихся под научно-методическим руководством РАН, до заказчиков, которыми являются предприятия Госкорпорации «Росатом».

В соответствии с Указом Президента Российской Федерации от 16 апреля 2020 г. № 270 разработана Комплексная программа Госкорпорации «Росатом» «Развитие техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии в Российской Федерации». В этой программе предусмотрена реализация пяти федеральных проектов:

«Двухкомпонентная атомная энергетика»;
«Термоядерные и плазменные технологии»;
«Новые материалы и технологии»;
«Проектирование и строительство референтных энергоблоков атомных электростанций, в том числе атомных станций малой мощности»;
«Экспериментально-стендовая база».

В рамках этих проектов предусмотрено:

создание основ новой ядерной энергетической системы будущего с технологиями повышенной безопасности и экологичности, обеспечивающей расширенное воспроизводство ресурсной базы атомной энергетике и доступность источников энергоснабжения для населения и промышленности;

развитие термоядерных и плазменных технологий для создания на их основе неисчерпаемых экологически чистых источников энергии, источников частиц и излучений различных назначений, мощных двигателей для космических аппаратов, инновационного оборудования для медицины, машиностроения, микроэлектроники и других наукоемких отраслей экономики;

разработка новых материалов с уникальными свойствами и широкого спектра инновационных технологий для повышения конкурентоспособности высокотехнологичных отраслей экономики и расширения номенклатуры выпускаемой ими продукции, в том числе в целях импортозамещения и повышения объемов несырьевого экспорта.

В выполнении этих перспективных проектов активное участие примут ученые Российской академии наук и научных организаций, находящихся под ее научно-методическим руководством.

Реализация этой масштабной программы крайне важна для России. Она будет способствовать ускоренному развитию нашей страны, продемонстрирует ее возможности стать мировым лидером в высокотехнологичных отраслях и позволит укрепить ее международный авторитет.

В нашей стране на основе выполненных научных исследований предложено новое высокотехнологичное направление – атомно-водородная энергетика, – производство и потребление водорода в качестве энергоносителя и накопителя энергии. Для реализации этого направления Россия имеет необходимые сырьевые ресурсы, а также научный задел, накопленный в процессе многолетних исследований и разработок в атомной отрасли, в научных организациях, находящихся под научно-методическим руководством РАН и в НИЦ «Курчатовский институт».

В соответствии с распоряжением Правительства Российской Федерации от 12 октября 2020 г. № 2634-р, утвержден план мероприятий «Развитие водородной энергетики в Российской Федерации до 2024 года». Реализация комплекса мероприятий этого плана по развитию водородной энергетики в нашей стране будет осуществляться органами исполнительной власти с участием предприятий Госкорпорации «Росатом», РАН, научных организаций, находящимся под научно-методическим руководством РАН, и других заинтересованных организаций.

На научной сессии общего собрания членов РАН были заслушаны и обсуждены доклады, посвященные истории атомного проекта и роли Академии наук в нем, актуальным направлениям фундаментальных и прикладных исследований и их научному обеспечению, перспективам научно-технологического развития атомной отрасли России, проблемам ядерной медицины, стратегической стабильности, ограничения и нераспространения вооружений, в том числе ядерных и др.

Общее собрание членов РАН ОТМЕЧАЕТ:

высокий уровень докладов, сделанных на научной сессии ведущими учеными РАН и Госкорпорации «Росатом» по важнейшим направлениям развития атомной отрасли, отражающих вклад Академии наук в нее и перспективы дальнейшего сотрудничества;

получение новых научных результатов по ряду актуальных приоритетных направлений фундаментальных исследований, соответствующих приоритетам развития Госкорпорации «Росатом»;

исключительно важное значение, придаваемое Российской академией наук и Госкорпорацией «Росатом» развитию фундаментальных, поисковых и прикладных исследований и широкому использованию полученных при этом результатов в интересах атомной отрасли;

положительный опыт сотрудничества РАН и Госкорпорации «Росатом», накопленный при формировании комплексных научно-технических программ и проектов полного инновационного цикла по приоритетным направлениям, определенным Стратегией научно-технологического развития Российской Федерации, утвержденной Указом Президента Российской Федерации от 1 декабря 2016 г. № 642, позволяющий формировать «цепочки» от проведения фундаментальных, поисковых и прикладных исследований, выполняемых учеными, до заказчиков в лице предприятий Госкорпорации «Росатом», реализующих результаты этих исследований в конкретные разработки и продукцию;

большую работу по рассмотрению предложений РАН и Госкорпорации «Росатом» в интересах формирования перспективных направлений совместной деятельности, а также программ и проектов проведения исследований и развития атомной отрасли.

Общее собрание членов РАН ПОСТАНОВЛЯЕТ:

1. Одобрить совместную деятельность РАН и Госкорпорации «Росатом» по актуальным направлениям научных исследований в интересах развития атомной отрасли, основными из которых являются:

физика экстремального состояния веществ при высокой плотности энергии;

физика лазеров и лазерная плазма;

ускорители заряженных частиц и сильноточные электрофизические установки;

управляемый термоядерный синтез;

атомная энергетика будущего;

ядерный топливный цикл и его замыкание;

морская ядерная энергетика;

космическая ядерная энергетика;

водородная энергетика;

новые материалы;

безопасность атомной энергетики, в том числе обеспечение радиационной безопасности;

расширенное воспроизводство ресурсной базы;

экологические аспекты обращения с радиоактивными отходами;

современные суперкомпьютеры, базы данных, разработка пакетов прикладных программ и импортозамещающих кодов;

современная диагностическая аппаратура;

ядерная медицина, лучевая терапия;

внеатмосферные астрофизические исследования, лабораторное моделирование астрофизических явлений;

рентгеновская астрономия, ядерная планетология и др.

Сопредседателям Рабочей группы по научно-техническому сотрудничеству Госкорпорации «Росатом» и Российской академии наук академику РАН Бондуру В.Г. и академику РАН Рыкованову Г.Н. продолжить работу по расширению направлений сотрудничества РАН и Госкорпорации «Росатом».

2. Поддержатъ предложенные Госкорпорацией «Росатом» в комплексной программе «Развитие техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии в Российской Федерации» приоритетные научно-технологические направления для развития энергетического сектора и высокотехнологичных производств российской экономики, прежде всего работы по замыканию ядерного цикла для полного использования энергетического потенциала уранового сырья. Результаты таких работ обеспечат переход на двухкомпонентную ядерную энергетику на основе замкнутого ядерного топливного цикла с реакторами на быстрых и тепловых нейтронах, а также внесут существенный вклад в декарбонизацию экономики. Это будет способствовать повышению экономических показателей и конкурентоспособности ядерной энергетики, расширению сфер и масштабов ее применения, а также ее превращению в ключевой элемент экологически чистой «зеленой» генерации.

3. Поддержатъ участие РАН и научных организаций, находящихся под научно-методическим руководством РАН, в реализации комплексной программы Госкорпорации «Росатом» «Развитие техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии в Российской Федерации» и обеспечить по согласованию с Госкорпорацией «Росатом» участие представителей РАН в органах проектного управления и экспертных советах этой комплексной программы.

4. Одобрить совместную деятельность РАН и Госкорпорации «Росатом» по формированию комплексных научно-технических программ и проектов полного инновационного цикла и опыт формирования замкнутых «цепочек» от ученых, проводящих научные исследования, до заказчиков, реализующих результаты этих исследований в конкретные разработки и продукцию.

5. Госкорпорации «Росатом» и РАН обратить особое внимание на необходимость укрепления кадрового потенциала атомной науки. Поддержатъ инициативу Госкорпорации «Росатом» о создании с участием Российского федерального ядерного центра – Всероссийского научно-исследовательского института экспериментальной физики (РФЯЦ-ВНИИЭФ) нового научно-образовательного комплекса – Национального центра физики и математики (НЦФМ) и принять участие в разработке долгосрочной программы исследований и развития НЦФМ и ее реализации.

6. Российской академии наук при актуализации Программы фундаментальных научных исследований в Российской Федерации на долгосрочный период (2021–2030 гг.) учитывать необходимость включения мероприятий, ориентированных на проведение фундаментальных

исследований в интересах реализации приоритетных направлений научно-технологического развития Госкорпорации «Росатом».

7. Одобрить деятельность научных организаций, находящихся под научно-методическим руководством РАН, в осуществлении исследований и реализации конкретных проектов в области стратегической стабильности, глобальной и региональной безопасности, ограничения и нераспространения вооружений, прежде всего ядерных. В условиях обострения отношений между Россией и США/НАТО, а также глубокого кризиса системы контроля над вооружениями активизировать усилия РАН и научных организаций, находящихся под научно-методическим руководством РАН, по расширению международного экспертного диалога (научной дипломатии) с участием авторитетных представителей науки в целях понижения уровня мировой напряженности и укрепления национальной безопасности Российской Федерации.

8. Научно-издательскому совету РАН в марте 2021 г. издать материалы настоящей научной сессии общего собрания членов РАН, общих собраний отделений РАН по областям и направлениям науки и региональных отделений РАН по рассматриваемой тематике в виде отдельной книги, а также разместить ее электронный вариант на официальном сайте РАН в информационно-телекоммуникационной сети «Интернет».

9. Представить руководству страны решения и рекомендации настоящей научной сессии общего собрания членов РАН.