

Российская академия наук
Объединенный институт высоких температур РАН
Московский физико-технический институт

**Электрофизика
и взрывобезопасность
высоковольтного
маслонаполненного
электрооборудования**

Москва
2019

УДК 537.3
ББК 22.33:31.261
С 62

С62 **Сон Э.Е., Фортгов В.Е., Азмеев Х.Х, Аксенов А.А., Бондарь В.С., Бабаева Н.Ю., Гаджиев М.Х., Зицерман В.Ю., Киверин А.Д., Коробейников С.М., Куликов Ю.М., Минцев В.Б., Панов В.А., Смирнов Б.М., Темис Ю.М., Тюфтяев А.С.** Электрофизика и взрывобезопасность высоковольтного маслонаполненного электрооборудования. – М. : РАН, 2019. – 420 стр.

Рецензенты:

Бутырин Павел Анфимович, член–корр. РАН, профессор ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ»
Ковалев Виктор Дмитриевич, д.т.н., директор по науке и инновационным программам ОАО «ЭЛЕКТРОЗАВОД».

Новиков Николай Леонтьевич, д.т.н., заместитель Научного руководителя, начальник Отдела новых электросетевых технологий ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС», профессор ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ»

ISBN 978–5–907036–35–2

Монография посвящена фундаментальным вопросам электрофизики высоковольтных явлений в газожидкостных системах, газообразованию и возникновению частичных разрядов в высоковольтных изоляционных жидкостях, приведены результаты экспериментальных исследований электрофизических свойств трансформаторного масла в смеси с воздухом и элегазом и растительных масел, приведены экспериментальные и теоретические результаты о теплофизических свойствах трансформаторного масла, полученные на ударных трубах в диапазоне высоких давлений до 10 ГПа. В монографии приведены методы численного моделирования гидродинамики и теплообмена в высоковольтном оборудовании, показано, что трансформаторное масло является термовязкой жидкостью, описаны разработанные модули пакетов программ Flow Vision и Gas Dynamic Tool для моделирования стационарных состояний и взрыва высоковольтных устройств, описаны методы моделирования быстропротекающих процессов, взрывов и кинетики напряженно-деформированного состояния разрушаемого электрооборудования, описаны динамические методы обеспечения взрывобезопасности высоковольтного маслонаполненного оборудования с помощью динамических систем сброса давления и продуктов взрыва, демпферных систем защиты пористыми металлами и созданием сжимаемой среды с заменой ударно-волнового на распределенный по времени и пространству рост давления на корпус; на основе предложенных методов могут быть разработаны новые решения и технологии создания взрывобезопасного высоковольтного оборудования. В российской и мировой литературе есть отдельные статьи по данной теме, но монография является первой, посвященной электрофизическим процессам, анализу и моделированию взрывов трансформаторов и другого высоковольтного маслонаполненного оборудования. Монография будет полезной для инженеров, научных работников, аспирантов и студентов энергетических и физико-математических специальностей университетов и вузов.

Монография подготовлена при поддержке Российского научного фонда по гранту 19–49–02031

© Авторы, 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	8
Глава 1. Кинетические и электрические явления в газожидкостных системах . . .	15
Глава 2. Экспериментальные исследования электрического пробоя в высоковольтных двухфазных средах	57
Глава 3. Электрофизические и теплофизические свойства изоляционных растительных масел	75
Глава 4. Теплофизические свойства трансформаторного масла	105
Глава 5. Экспериментальное исследование ударной сжимаемости ТМ в интервале давлений 0.01–10.0 ГПа	129
Глава 6. Численное моделирование гидродинамики и теплообмена в высоковольтном маслonaполненном электрооборудовании	157
Глава 7. Моделирование взрывов и кинетики напряженно- деформированного состояния ВМЭО	215
Глава 8. Динамические методы взрывобезопасности ВМЭО.	275
Глава 9. Демпферные системы защиты корпусов ВМЭО.	279
Глава 10. Демпферные системы защиты ВМЭО на основе газожидкостных систем	369
Заключение.	416

ПРЕДИСЛОВИЕ

Актуальность проблемы обеспечения взрывоустойчивости объектов электроэнергетики обусловлена ощутимыми негативными последствиями экономического, социального и экологического характера при взрыве трансформаторов, регуляторов напряжения и вообще высоковольтного маслаполненного электрооборудования (ВМЭО). Как свидетельствует российская и зарубежная статистика, трансформаторы и высоковольтное маслаполненное оборудование имеют крайне высокий риск (10^{-2}) взрыва и пожара при коротком замыкании, что в десятки–сотни раз превышает риск аварий любых других технических систем, для которых характерен риск не более 10^{-4} (10^{-5} для атомных станций).

В мае 2005 г. после пожара на подстанции «Чагино» произошло веерное отключение электричества, в результате которого был обесточен юг Москвы и часть Подмоскovie, а также несколько районов в Тульской и Калужской областях. В столице на длительное время без электричества остались шесть линий метрополитена, 19 тыс. жилых домов. Оказались обесточены потребители на территории пяти административных округов Москвы: Южного, Юго-Восточного, Юго-Западного, Восточного и Центрального, а также на территории Московской, Калужской, Тульской областей. Без электричества оказались две станции аэрации и три регулирующих узла водоснабжения, жилые дома, детсады, медицинские учреждения, школы и интернаты. Погас 1581 светофор. Было прекращено движение 656 маршрутов наземного электротранспорта, нарушена работа 159 телефонных станций. Тогда причинами аварии были названы износ оборудования и ошибки персонала подстанции «Чагино», с которой началось развитие аварии. В отчете комиссии РАО «ЕЭС России» по расследованию энергоаварии в Московском регионе говорится, что, согласно выводам комиссии, «причиной аварии стало наложение ряда факторов, каждый из которых в отдельности не привел бы к аварии и тем более с такими масштабами». Несмотря на принятые меры через 3 года 17 мая 2008 г в начале шестого вечера в субботу начался пожар на Чагинской тяговой электроподстанции. Сигнал о возгорании поступил в 17:20, пожару был присвоен второй уровень сложности по пятибалльной шкале. Общая площадь возгорания составляла порядка 500 кв. метров. Для тушения огня были задействованы два пожарных вертолета, на месте происшествия работали 18 пожарных расчетов, которые тушили пламя водой и огнегасящей пеной. В 20:30 пожар удалось локализовать. Пожар не привел к отключениям электричества, так как загорелся один из новых трансформаторов, который не был задействован в энергообеспечении во время его испытательного пуска.

По данным ВНИИПО, в 2016 году пожары, которым предшествовал взрыв и разгерметизация масляного бака в результате короткого замыкания на трансформаторах и стабилизаторах, произошли на 506 объектах. При этом прямой ущерб составил 22 млн 261 тыс. рублей. В 2007 году пожары зафиксированы на 454 трансформаторах, что привело к прямому ущербу в 2 млн 564 тыс. рублей, гибели 16 человек, травмированию 221 человека.

Статистика аварий по другим странам также свидетельствует о неэффективности системы защиты трансформаторов от взрыва и пожара при коротком замыкании.

В настоящее время в мире в эксплуатации находится около 400 тыс. больших трансформаторов, в США – около 120 тыс. трансформаторов, количество взрывающихся трансформаторов велико, вероятность их взрыва является одной из самых высоких для промышленного оборудования, что имеет экономические и социальные последствия. Согласно базе данных США по пожарам трансформаторов (United States Department of the Interior: Transformer Fire Protection. Facility Instructions, Standards and Techniques, Vol. 32, Jan. 2005), только в США в течение одного года произошло 730 взрывов трансформаторов, ущерб от которых составил несколько сот миллионов долларов (0,5 млн на 1 МВт мощности трансформаторов). Многие зарубежные эксперты предсказывают, что в ближайшем будущем количество взрывов вырастет с 1 % в 2001 году до 2 %. Используемые в настоящее время отечественные и зарубежные системы защиты трансформаторов и высоковольтного маслонаполненного оборудования от взрыва и пожара при коротком замыкании хронически не способны выполнить свою функцию.

Проблема взрывобезопасности ВМЭО в России была поставлена в энергетике в ряд важнейших после аварии в Чагино. К этому же времени относится период активных научных исследований, проводимых в институтах РАН по электроэнергетике по заказам крупных энергетических компаний, таких как РАО ЕЭС, затем Федеральной сетевой компанией (ФСК ЕЭС), в рамках которых было установлено сотрудничество с крупнейшими производителями ВМЭО, такими как Московский электрозавод и другими. В результате нескольких лет работы были предложены различные варианты систем безопасности ВМЭО, разработаны методы и созданы макетные и опытные образцы электрооборудования. На первом Российском энергетическом форуме по электроэнергетике в 2012 г. ОИВТ РАН выставил 25 тонн научного оборудования, превывсив по уровню и объему нового оборудования ведущие российские, западные и японские компании. Это показало потенциальные способности российской науки создавать современное наукоемкое оборудование по заказам промышленности.

Целью настоящей книги является ознакомление специалистов, инженеров, аспирантов и студентов с технологиями, в основе которых часто лежат новые физические принципы, на примере электроэнергетики, где физика процессов оказалась настолько сложной, что многие научные и прикладные вопросы решаются только сейчас, в этих задачах велика роль численного моделирования и натурального эксперимента.

Эта книга не является конкретным предложением внедрения технологий, хотя в некоторых случаях созданные технологии уже внедряются или близки к внедрению. Нашей задачей было показать, в каком направлении могут развиваться новые технологии с использованием последних достижений в физике и электроэнергетике.

Содержание монографии следующее: первая глава посвящена фундаментальным вопросам электрофизики высоковольтных явлений в газожидкостных системах, поскольку в ВМЭО деградация трансформаторного

масла и возникновение частичных разрядов связаны с образованием примесей и микропузырьков. За последние годы выполнено большое количество исследований, которые изложены в данной главе, материалы подготовлены Бабаевой Н.Ю. и Смирновым Б.М. Вторая глава посвящена газообразованию и возникновению частичных разрядов в высоковольтных изоляционных жидкостях, приведены результаты экспериментальных исследований электрофизических свойств трансформаторного масла в смеси с воздухом и элегазом, глава подготовлена Пановым В.А. Третья глава написана Коробейниковым С.М., она содержит результаты электрофизических и теплофизических свойств растительных масел, которые могут быть заменителями трансформаторного масла вследствие его экологичности, но проблемы взрывобезопасности при этом сохраняются. Четвертая глава (В.Ю. Цицерман) посвящена методам расчетов теплофизических свойств трансформаторного масла. Пятая глава содержит экспериментальные исследования ударной сжимаемости трансформаторного масла на ударных трубах в диапазоне высоких давлений до 10 ГПа, глава написана В.Б. Минцевым. Шестая глава посвящена численному моделированию гидродинамики и теплообмена ВМЭО, здесь показано что трансформаторное масло является термовязкой жидкостью, в которой существенную роль играет сильная зависимость вязкости от температуры. Далее в шестой главе описаны разработанные модули пакетов программ Flow Vision и Gas Dynamic Tool для моделирования стационарных состояний и взрыва высоковольтных устройств, глава написана Соном Э.Е., Куликовым Ю.М. и Аксеновым А.А. Седьмая глава, подготовленная Бондарем В.С. и Темисом Ю.М., посвящена моделированию взрывов и кинетики напряженно-деформированного состояния ВМЭО, численное моделирование выполнено на пакете LS DYNA. Восьмая глава посвящена динамическим методам защиты трансформаторов от взрыва. Приведено описание системы компании «SERGI» и некоторые ее недостатки. В девятой главе, написанной Соном Э.Е., Бондарем В.С., и Темисом Ю.М., приведено описание предлагаемых демпферных систем защиты корпусов, использованы результаты, полученные в Центре МГСУ «Взрывоустойчивость» под руководством Мишуева А.В., приведены результаты экспериментов и методов расчета пористых металлов, используемых для защиты от взрывных нагрузок, и их возможное применение для защиты высоковольтных трансформаторов, приведены результаты экспериментов с использованием демпферных материалов для защиты от взрывной нагрузки высоковольтных трансформаторов, имитируемой разрядом конденсаторной батареи с большим энергозапасом (эксперименты проведены Юсуповым Д.А., Гаджиевым М.Х. и Тюфтяевым А.С.). Десятая глава посвящена методу создания сжимаемой среды и трансформаторного масла для перехода от резкого гидравлического удара вследствие короткого замыкания и образования ударной волны в жидкости к рассредоточенному воздействию «размытого» импульса в газожидкостной среде, что достигается введением малой объемной доли элегаза в трансформаторное масло. Этот метод снижения нагрузок может использоваться не только для высоковольтного оборудования, но и в ряде других задач, связанных с физикой взрыва в газожидкостных системах. Описан созданный макетный образец по этой технологии и

результаты проведенных его испытаний на взрывобезопасность. Десятая глава подготовлена Соном Э.Е., эксперименты проведены Даниловым И.М., Гаджиевым М.Х., Тюфтяевым А.С. и Юсуповым Д.А.

Книга будет полезна специалистам в области электроэнергетики, инженерам, научным сотрудникам, аспирантам и студентам физико-математических и энергетических специальностей.

БЛАГОДАРНОСТИ

В проекте РАН – ФСК ЕЭС принимало участие несколько коллективов институтов РАН и специалистов ФСК, без участия которых эта работа бы не состоялась. Авторы книги выражают благодарность сотрудникам ФСК ЕЭС Бударгину О.М., Мурову А.Е., Горюшину Ю.А., Дементьеву Ю.А., Шакарян Ю.Г., Новикову Н.Л. Мы также хотели бы отметить большой благодарностью тех, кто начинал эту работу с нами, но не смог закончить, и их дело было продолжено учениками – Зибарова А.В., Иванова М.Ф., Милявского В.В., Иориша В.М., Исакаева Э.Х. Многие сотрудники ОИВТ РАН и МФТИ внесли существенный вклад в эти работы, и мы им выражаем благодарность: Апфельбауму Е.М., Великодному В.Ю., Данилову И.М., Дыренкову А.В., Жлуктову С.В., Иосилевскому И.Л., Кобзеву Г.А., Кьянгу О., Найдису Г.В., Сону К.Э., Третьяковой О.Н., Уткину А.В., Юсупову Д.А. и др.

От коллектива авторов Э.Е. Сон, В.Е. Фортов

ВВЕДЕНИЕ

Снижение надежности и безопасности высоковольтного масляного оборудования (ВМЭО), включая трансформаторы, определяют необходимость анализа и новых предложений по разработке взрывобезопасного оборудования. Пожары ВМЭО являются критическими вследствие большого количества масла, находящегося в контакте с элементами при высоком (сотни киловольт) напряжении. Вследствие особой важности использования высоковольтных масляных трансформаторов на атомных станциях, информация о взрывах содержится в базе данных по взрывам трансформаторов на АЭС (ОЭСР FIRE database [1]). Эта база данных содержит данные в основном о пожарах высоковольтных масляных трансформаторов.

Причины взрывов и пожаров трансформаторов могут быть различными, к ним можно отнести дефекты конструкции, скачки напряжения, удары молнии, структурные повреждения, медленно накапливающиеся дефекты (старение) трансформаторного оборудования, быстрое неожиданное нарушение изоляции (электрический пробой), человеческий фактор (ошибки обслуживания) и другие. Опыт показывает, что последствия таких событий могут быть серьезными, это связано с тем, что трансформаторы с масляным охлаждением содержат, как правило, несколько тысяч литров горючего изолирующего масла. Взрыв и пожар может привести к серьезному повреждению не только трансформатора, в котором произошел взрыв, но и структурных компонентов электростанции – стен, зданий, близлежащих трансформаторов и другого электрооборудования. В базе данных [1] содержится информация о 730 взрывах трансформатора только в США.

Многие эксперты считают, что коэффициент отказа трансформатора значительно возрастет в ближайшем будущем до 0,02 в год. Кроме того, более короткий срок службы новых трансформаторов может резко увеличить число отказов выше этого показателя в ближайшем будущем.

В России наиболее дешевой является электроэнергия, получаемая на гидроэлектростанциях на больших реках, которые находятся в Сибири, а потребление электроэнергии промышленностью сосредоточено в Европейской части России, поэтому необходима передача электроэнергии на большие расстояния. Малые потери в электрических сетях происходят при высоких напряжениях, более 100 кВ. На электростанциях трансформаторы преобразуют напряжение генератора (11 – 25 кВ) на более высокий уровень для передачи электроэнергии в магистральную сеть при напряжениях 110 кВ, 220 кВ, 330 кВ, 750 кВ, 1000 кВ, и даже 1,5 МВ. Передача электроэнергии происходит по проводным линиям электропередач (ЛЭП) с опорами в виде высоких металлических башен на расстояния в сотни и тысячи километров. После передачи к потребителю напряжение магистральной сети должно снова быть преобразовано к более низкому напряжению на трансформаторных подстанциях, как правило, 6 кВ, 10 кВ и др. в зависимости от типа оборудования потребителя. Пониженное напряжение далее перераспределяется до уровня, адаптированного для бытового использования, т.е. 380 В (3 фазы) или 220 В (1 фаза) на распределительных подстанциях, прилегающих к тер-

риториальным, коммерческим и малотоннажным промышленным потребителям. На рис. 1 показана типичная сетевая система производства, передачи и потребления электроэнергии.

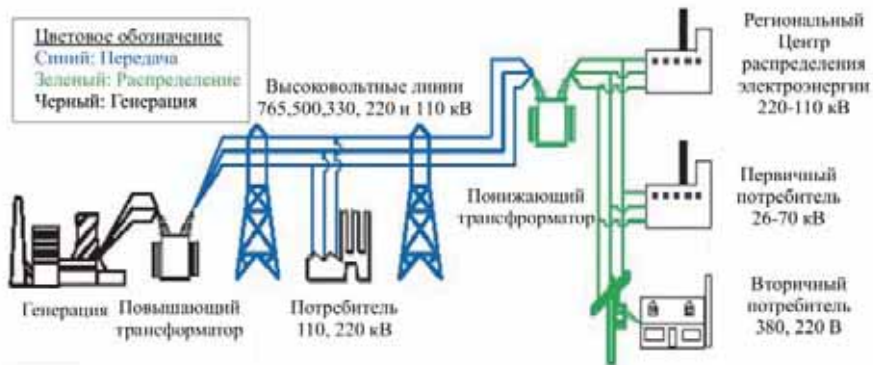


Рис. 1. Типичная электрическая сеть [2].

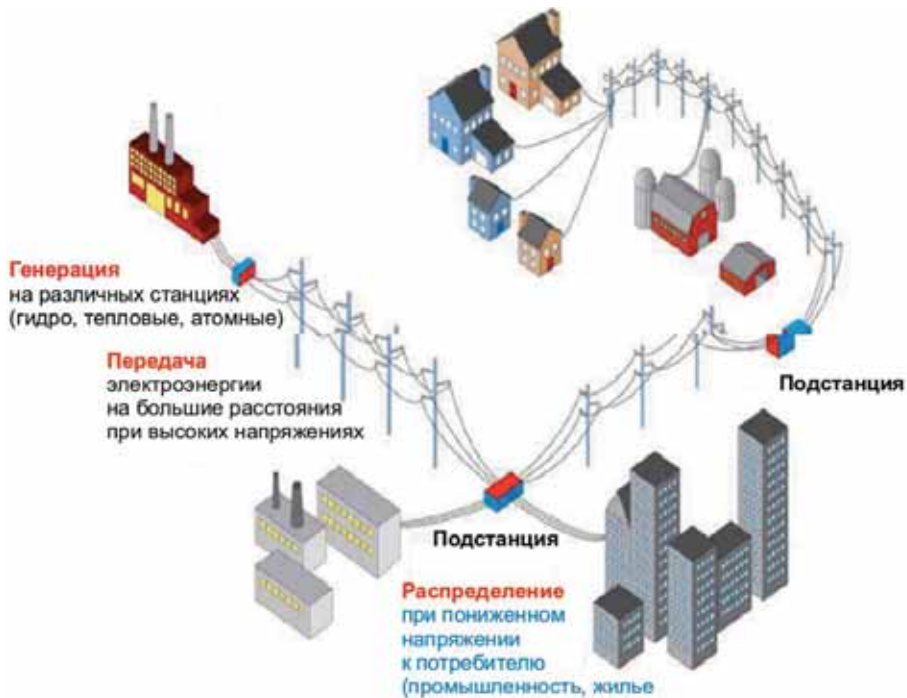


Рис.2 Схема подключения потребителей [2].

Международный опыт анализа пожарной опасности и вероятностные оценки безопасности ВМЭО привели к необходимости создания Стандартов повреждения электростанций и международной базы данных по анализу пожаров. Это вызывается необходимостью прогнозирования и реалистичного моделирования пожаров, в настоящее время отсутствие информации вызывает трудности нехватки надежных количественных данных для

анализа и моделирования пожарной опасности. Несколько стран-членов Агентства по ядерной энергии (NEA) ОЭСР приняли в 2003 году решение о создании Международного проекта по обмену опытом (ОЭСР РПИ) в сборе и анализе данных, связанных с пожарами на атомных электростанциях, результаты которого приведены в [2].».

Пожар в базе данных FIRE OECD определяется следующим образом. Пожаром называется:

а) любой процесс горения, характеризующийся выбросом тепла, сопровождающийся (открытым) пламенем или дымом или и тем, и другим;

б) быстрое горение распространяется неконтролируемым образом во времени и пространстве.

Каждый пожар в базе данных ОЭСР FIRE описывается повествовательным описанием развития процесса и формализован кодированными описательными полями, выбираемыми из меню.

В настоящее время записи о 415 пожарах на атомных электростанциях в 12 странах-членах OECD/NEA включены в базу данных ОЭСР FIRE. Эта база данных обеспечивает источник качественной и количественной информации, например, о месте возникновения пожара, процессе и продолжительности событий. Ниже приведены данные о роли напряжения на пожары и длительность пожаров. Вместе с тем, следует отметить, что критерии представления докладов о событиях в странах-членах ОЭСР различны. Некоторые страны, такие как Канада, Финляндия и Швеция, могут сообщать о каждом событии пожара; другие, такие как Германия, Франция и Соединенные Штаты, сообщают о пожарах на атомных станциях только в случае, если возникает угроза распространения радиоактивного загрязнения или важными являются дополнительные параметры, такие как продолжительность пожара.

Высоковольтные трансформаторы (напряжение 50 кВ), как правило, устанавливаются во дворе (вне технических зданий). К ним относятся трансформаторы ввода мощности, вспомогательные трансформаторы включения, пусковые, измерительные трансформаторы и др.

Пожары в высоковольтных трансформаторах делятся на «катастрофические» и «некатастрофические», которые определяются и кодируются отдельно в базе данных FIRE ОЭСР следующим образом:

а) «катастрофический пожар» большого трансформатора определяется как энергетический сбой трансформатора, который включает в себя разрыв трансформаторного бака, разлив нефти и горение масла, разбрызганного на различные расстояния от трансформатора;

б) «некатастрофический пожар» включает в себя высоковольтные трансформаторы питания, обычно установленные во дворе, не связанный с разрывом трансформаторного бака, разливом нефти и сжиганием масла, разбрызганного на некотором расстоянии от трансформатора.

В трансформаторы со средним или низким напряжением (уровень напряжения 3 – 50 кВ) включают все трансформаторы, которые не являются неотъемлемой частью другого, более крупного оборудования. Кроме того, средне- или низковольтные трансформаторы могут быть сухими, или заполненными маслом.

Среди зарегистрированных в базе данных ОЭСР FIRE 415 пожаров на атомных станциях, 53 события, представляющих 12,8 % всех пожаров, произошли по причине возгорания трансформаторов, поэтому трансформаторы являются наиболее частым источником пожаров. Большинство из них произошло на маслонаполненных трансформаторах высокого напряжения и большинство этих трансформаторных пожаров классифицируются как катастрофические, что показано на рис. 3.

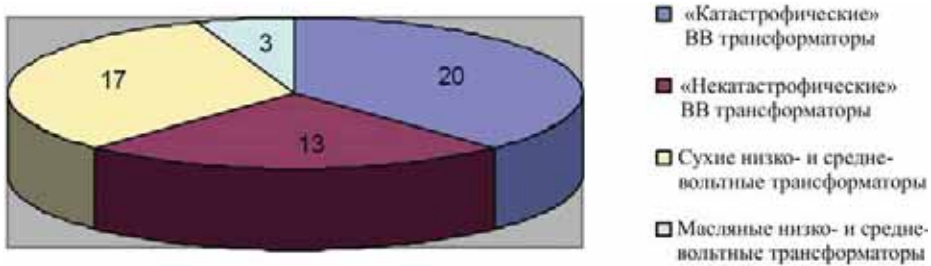


Рис. 3. Статистика пожаров трансформаторов [2].

Продолжительности времени пожаров приведены на рис. 4, откуда следует, что половина трансформаторных пожаров может быть успешно подавлена за 30 минут, и только 3 пожара (маслонаполненных высоковольтных трансформаторов) длились более трех часов. В 9 случаях продолжительность пожаров трансформатора неизвестна, некоторые из них, возможно, длились более 3 часов.

На практике число пожаров трансформаторов может быть выше, чем сообщается в базе данных ОЭСР, в связи с использованием различной отчетности в странах – членах ОЭСР.

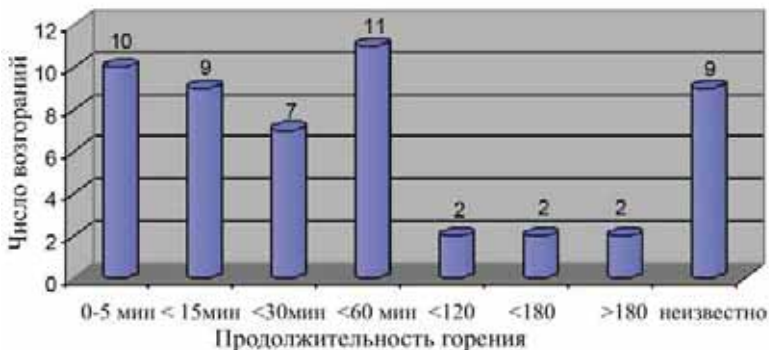


Рис. 4. Длительность пожаров трансформаторов [2].

Основными проблемами предотвращения пожаров ВМЭО являются выполнение технологических нормативов обслуживания оборудования, внедрение стандартизированных тестовых методов диагностики оборудования, исследования старения трансформаторов и точное прогнозирование

длительности жизни трансформатора с временем работы более 25 лет из-за повышения коэффициента отказов оборудования.

Большое количество трансформаторов, установленных на российских электростанциях высокой и особенно, средней мощности, уже превышают время жизни, поэтому дальнейшие повреждения и выходы из строя трансформаторов не могут быть исключены.

Из статистики пожаров на трансформаторах следует, что пожары наблюдались как для трансформаторов со сроком службы 25 до 30 лет, так и с недавно установленными трансформаторами. Надежная база данных по измеренным результатам, из которой можно извлечь конкретные возрастные показатели отказов, отсутствует, поэтому замена трансформаторов вследствие истечения срока службы не всегда обоснована.

Для российских электростанций должен быть разработан ГОСТ с унифицированным планом испытаний всех систем трансформатора, наличия частичных разрядов (ЧР), старения масла и определения многих других параметров. По свидетельству многих электроэнергетиков (частная информация Ю.А. Деметьева) еще в довоенные годы в СССР были специалисты «слухачи», которые по звуку работы трансформатора определяли существование частичных разрядов и на этой основе делался вывод о необходимости проведения ремонтных работ. В настоящее время несколько фирм в России, Великобритании и США разрабатывают томографические устройства, позволяющие определить не только существование ЧР, но и их локализацию, с выводами о состоянии маслонаполненных трансформаторов. Этот ГОСТ должен включать в себя минимальный уровень и сроки испытаний, которые должны проводиться через определенные промежутки времени для генераторных и передающих электроэнергию трансформаторов, трансформаторов для собственного потребления, резервной мощности, измерительных, аварийных, трансформаторов питания и других. Этот мониторинг трансформаторов на электростанциях должен быть построен на основе созданных и ведущихся баз данных, анализа и диагностики на всех российских электростанциях.

Оценка риска для трансформаторов охватывает анализ всех возможных причин сбоев и связанных с этим последствий. Одной из важных причин взрывов и пожаров трансформаторов является старение трансформаторов. Срок эксплуатации трансформатора является одним из важных показателей, он определяется состоянием и деградацией современных материалов, которые наряду с уникальными свойствами могут иметь ограниченные сроки службы. За время эксплуатации трансформатора ухудшаются прочность конструкций элементов и узлов, изоляционные свойства материалов, используемых для электрической изоляции (особенно бумаги), старения трансформаторного масла, которые снижают как механическую, так и диэлектрическую прочность. Все трансформаторы, находящиеся в длительной эксплуатации, подвергаются высокочастотным вибрациям, поэтому со временем зажимы и изоляция могут со временем не выдерживать токи короткого замыкания, которые могут привести к механическим повреждениям и, как следствие, к взрывам и пожарам.

Существует важная зависимость вероятности пожаров и напряжением, которое изображает растущую вероятность отказа трансформатора, приводящего к пожару для более крупных трансформаторов, как показано на рис. 5. Статистический анализ указывает на большую вероятность пожаров для трансформаторов с высоким напряжением вследствие большей вероятности электрического пробоя при повышении напряжения и большей мощности, выделяющейся при возникновении электрической дуги.

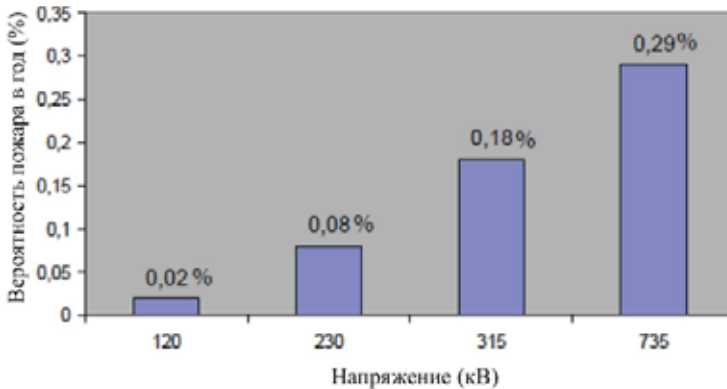


Рис. 5. Вероятность пожара в зависимости от напряжения.

Хотя фактический срок службы варьируется в широких пределах в зависимости от дизайна, качества сборки, используемых материалов, технического обслуживания и условий эксплуатации, срок службы трансформатора составляет около 40 лет, но на практике он даже в Германии составляет от 20 до 30 лет [2]. Таким образом, необходимы регулярные меры по диагностике трансформаторов и своевременной замены, поскольку стареющие трансформаторы представляют опасность для электроснабжения.

Взрывы ВМЭО происходят, как правило, в результате развития дугового разряда при внутреннем коротком замыкании. Начальный проводящий канал в трансформаторном масле образуется обычно вследствие постепенной деградации внутренней изоляции при возникновении и развитии в ней частичных разрядов. Полная энергия, выделяющаяся в дуговом разряде, может достигать до нескольких десятков мегаджоулей в силовых трансформаторах. При этом происходит интенсивное разложение трансформаторного масла с выделением большого объема газообразных продуктов разложения изоляции и горения масла. Рост температуры и выделение газа приводит к значительному росту давления в баке трансформатора. Если бак при этом не разрушается, то кислород воздуха не поступает в бак и не смешивается с высокотемпературным маслом и взрыва и пожара не происходит, поэтому меры по предотвращению разрушения корпусов трансформаторов являются одними из первоочередных при разработке взрывобезопасных трансформаторов.

Литература

1. United States Department of the Interior: Transformer Fire Protection. Facility Instructions, Standards and Techniques, Volume 3 32, January 2005.
2. Berg, H.P., Fritze, N. Reliability of main transformers, Reliability: Theory and Applications, Vol. 2, No. 1, 52–69, March 2011.
3. Valta, V. Oil-insolated power transformers. If s Risk Management Journal, 2/2007, 13 15.
4. Ng, K.-L. A. Risk assessment of transformer fire protection in a typical New Zealand high-rise building. Thesis, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, 2007.
5. Organization for Economic Cooperation and Development (OECD), Nuclear Energy Agency (NEA). OECD FIRE Database, Version 2012.1, Paris, December 2012.
6. Organization for Economic Co-operation and Development (OECD): OECD/NEA/CSNI, FIRE Project Report: Collection and Analysis of Fire Events (2002–2008). First Applications and Ex-pected Further Developments, NEA/CSNI/R(2009)6, Paris, 2009.
7. VGB PowerTech: Monitoring concept for oil-filled transformer in nuclear power plants, VGB-M-160, First Edition, July 2010 (in German).
8. Blake, S., Taylor, P., Black, M., Miller, D.: Using condition data and fault consequence to in-form asset replacement programmes, Proceedings of the International Colloquium Transformer Research and Asset Management, Dubrovnik, Croatia, May 16 18, 2012.
9. Bartley, W.H. Ageing transformers, Munich Re, Schadenspiegel, Issue 2/2011, 14 19.
10. Foata, M. Transformer fire risk and mitigation, CIGRE A2 Transformers Session, 2010.
11. Методика бездуговых испытаний на взрывобезопасность и взрывозащищённость высоковольтного маслаполненного электротехнического оборудования. Стандарт ОАО «ФСК ЕЭС». 2011 г.
12. Petersen A. “The Risk of transformer fires and strategies which can be applied to reduce the risk” // Сессия CIGRE-2010. France. Paris. 2010. Report A2–101.
13. ГОСТ 11677–85. Трансформаторы силовые. Общие технические условия. Введ. 86–07–01. М.: ИПК Издательство стандартов, 1999, 39 с.
14. Львов М.Ю. Анализ повреждаемости силовых трансформаторов напряжения 110 кВ и выше. Изд-во «Знак», Электричество, 2010, №2, с. 2–7.
15. Инновационные технические решения в программе НИОКР ПАО «ФСК ЕЭС». под ред. Мурова А.Е. М. 2018.

ГЛАВА 1. КИНЕТИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В ГАЗОЖИДКОСТНЫХ СИСТЕМАХ

Рассмотрены дисперсные системы, состоящие из жидкости и находящейся в ней пузырьков газа. Проанализированы две возможные схемы эволюции пузырьков при рассматриваемых условиях. В простых жидкостях контакт двух пузырьков приводит к их слиянию, поскольку разделяющая пленка разрушается. В случае сложных органических жидкостей на поверхности пузырьков образуется амфифильная пленка, и время жизни пузырьков при контакте растет с увеличением их размера. При этом во внешнем электрическом поле образуются цепочки пузырьков, выстроенные вдоль потенциальных линий электрического поля. Присутствие пузырьков в жидкости существенно снижает порог пробоя, так как критические параметры поля пробоя в жидкостях на два-три порядка превышают эти величины в газах при атмосферном давлении. Представлены различные механизмы пробоя в жидкостях с точки зрения образования газовой фазы в процессе прохождения электрического тока через жидкую среду. Исследован характер распространения стримера в отдельных пузырьках, при случайном распределении пузырьков в жидкости и в случае образования структур пузырьков, представлены критические параметры дисперсных систем, обеспечивающие их электрический пробой. Наряду с общими концепциями электрического пробоя в дисперсных системах рассмотрены экспериментальные исследования этих процессов, а также проанализирован характер электрического пробоя в жидких диэлектриках, включая трансформаторное масло. Представлены экспериментальные результаты, свидетельствующие о существовании микропузырьков в образцах трансформаторного масла различного класса промышленной чистоты. В основу методики положен эффект увеличения геометрических размеров микропузырьков в жидкости при воздействии волны отрицательного давления. В трансформаторном масле электромагнитным излучателем генерировались биполярные ударные волны (УВ), которые, отражаясь от свободной поверхности, создавали пониженное давление, достаточное для развития кавитации в ТМ.

Введение

Дисперсные системы являются своеобразным физическим объектом, который существует как в разных формах в окружающей нас природе, так и при использовании в прикладных целях. Рассмотрим далее в качестве такой системы жидкость, содержащую газовые пузырьки. Простейшим примером такой системы является естественный водоем, внутри которого в результате фотосинтеза с участием находящихся там растений происходит образование кислорода или же в результате процессов гниения образуется метан.

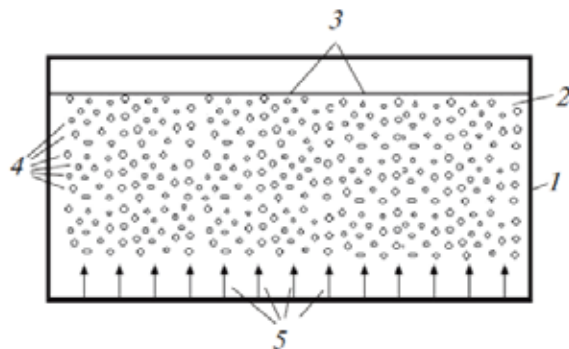


Рис. 1.1. Один из способов генерации газовых пузырьков в жидкости: 1 – контейнер; 2 – жидкость, граница раздела между окружающим газом и жидкостью; 3 – поверхность раздела газ–жидкость; 4 – пузырьки; 5 – образующиеся в жидкости молекулы газа

Накопление газа может происходить и в более глубоких слоях Земли и проникать в водоем в результате просачивания через почву как пористую среду. Кислород или метан растворяются в воде, так что молекулы газа находятся в узлах между молекулами воды и сама вода остается однородной. Если количество газа в жидкости превышает максимальное, определяемое его растворимостью, избыток газа уходит из воды. В процессе выделения газ образует пузырьки в жидкости, и такая система является неравновесной. Кинетика происходящих в ней процессов включает рост пузырьков при коагуляции и удаление пузырьков при всплывании под действием Архимедовой силы.

При этом характер объединения пузырьков зависит от свойств пленки, отделяющей газ от жидкости. В простых жидкостях, таких как вода, эта пленка между газом и жидкостью имеет ту же структуру взаимодействующих молекул жидкости, что и в самой жидкости. Тогда контакт двух пузырьков приводит к разрушению разделяющей их поверхности и образованию объединенного пузырька. Другая ситуация имеет место в органической жидкости, граница раздела которой с газом имеет амфифильную структуру. Последнее означает, что молекулы, находящиеся на границе раздела, могут аппроксимироваться протяженными линейными молекулами, на концах которых сосредоточены заряды разного знака, причем взаимодействующие молекулы вытянуты в одинаковом направлении и знаки их зарядов с каждой стороны также одинаковы. Это создает мембрану на поверхности жидкости, препятствующую прохождению через границу раздела определенных молекул. Такие структуры распространены в живом мире и ответственны за принципиальные свойства биологических объектов. В плане рассматриваемых проблем представляет интерес другое свойство этих структур. Именно при контакте двух пузырьков с такой границей амфифильная структура пленки на границе каждого пузырька препятствует их объединению. В конечном итоге при контакте многих пузырьков образуется пена, где соседние пузырьки разделены пленкой. Следует отметить, что амфифильная структура пленки пузырька формируется начиная с определенных размеров пу-

зырька. Поэтому рост малых пузырьков происходит так же, как и в простых жидкостях.

Имеются три механизма образования пузырьков в жидкости. В первом случае газовые молекулы образуются в жидкости в результате химических и других процессов и далее объединяются в пузырьки газа. Примером является образование кислорода в воде в результате фотосинтеза с участием находящихся под водой растений (рис. 1.1). Во втором случае газ проникает в жидкость через пористую среду, причем давление в области, из которой он попадает в жидкость, превышает давление в жидкости. Примером такого рода является использованная в эксперименте [1] схема, где воздух проникал в воду через модифицированный силикагель. Этот метод реализуется в природе, когда газ образуется под землей в результате процессов гниения и далее через почву проникает в болото. В третьем случае пузырьки образуются на границе газа и жидкости и попадают в жидкость при сильном возбуждении на границе раздела. Эти процессы происходят в турбулентных потоках воды, в водопадах, которые реализуются сходным образом в природе и лабораторных условиях [2, 3]. Подобным образом протекают процессы и при ультразвуковом возбуждении жидкости (например, [4–6]). Как видно, газовые пузырьки могут быть образованы в жидкости при естественных процессах, а также могут быть введены в жидкость указанными выше методами.

Присутствие пузырьков в жидкости вызывает резкое снижение порога электрического пробоя. Действительно, в простейшем таунсендовском пробое его порог определяется критическим значением удельной напряженности электрического поля E/N , т.е. отношением напряженности электрического поля E к концентрации атомов или молекул N . Поскольку концентрация молекул в газе при атмосферном давлении на два-три порядка ниже, чем в жидкости, пробойная напряженность электрического поля в жидкости существенно выше, чем в газе. Влияние присутствующих в жидкости газовых пузырьков на электрический пробой может проявляться по-разному, и в данном обзоре рассмотрены различные механизмы электрического пробоя в жидкости с газовыми пузырьками. Анализируются электронный и пузырьковый механизмы электрического пробоя в жидкостях с разными значениями диэлектрической проницаемости. Первый аналогичен механизму пробоя газов, обусловленному ионизацией частиц среды электронным ударом, второй связан с образованием парогазовых пузырьков, формирующих проводящий канал, по которому возможно перескакивание стримеров. Показано, что лавинно-стримерный переход и формирование стримеров в изолированных пузырьках определяются величиной приложенного поля, параметром pd (p – давление в пузырьке, d – его размер), а также наличием электрических зарядов внутри пузырька, их величиной и местоположением. Обсуждается взаимосвязь между размером пузырька и величиной минимально возможного начального заряда, необходимого для развития стримера. Анализируются поведение ансамбля пузырьков во внешних полях и возможность их выравнивания в цепочки. Показано, что из-за взаимной поляризации пузырьков процесс перескакивания стримеров из пузырька в пузырек происходит по-разному в цепочках, ориентированных вдоль и по-

перек вектора электрического поля. Обсуждается зависимость этого процесса от расстояния между пузырьками и природы жидкости.

Электронный и пузырьковый механизмы пробоя иллюстрируются двумерными расчетами стримеров в диэлектрических жидкостях с высокой подвижностью заряженных частиц и в газовых пузырьках, погруженных в трансформаторное масло и воду. Разряды в жидкости можно разделить по механизму развития на пузырьковый, микровзрывной, ионизационный, электрострикционный и электротепловой. Пузырьковый и электрострикционные механизмы схожи в том, что разряд начинает развиваться в газовой фазе, но образование последней в жидкости имеет разную физическую природу. Ионизационному механизму присущи сильные электрические поля вплоть до напряженностей 10^{10} В/м и малое время фронта нарастания: менее 1 нс (такого времени достаточно для автоионизации). Микровзрывной механизм характеризуется образованием ударных волн, расходящихся от разогретого проводящего канала, и типичен для разрядов, развивающихся с анода. Электротепловой механизм характерен для проводящих жидкостей с достаточно большими временами импульса на уровне 100 мкс и может развиваться по лидерному принципу. Далее мы рассмотрим эти механизмы более подробно.

Рассматривая электрический пробой в жидкости, содержащей пузырьки газа, отметим большой прогресс в экспериментальном исследовании этого явления, достигнутый в последнее время.

Используемые для данной цели методы включают в себя одновременное измерение тока разряда и излучаемого света, спектральный анализ излучаемого света, высокоскоростные методы фотографии и обработки изображений и характеризуются высокой скоростью записи теневого распространяющихся каналов [7–9]. Особый интерес представляют электрооптические измерения напряженности электрического поля в воде с приэлектродными проводящими слоями [10, 11]. Поскольку электрический пробой в жидкостях с пузырьками имеет стримерную природу, экспериментальное исследование указанного явления требует наносекундного временного разрешения [12–19].

Результаты этих исследований составляют основу современных представлений о поведении жидкости с газовыми пузырьками в сильном электрическом поле. Целью данного обзора является анализ физических процессов, составляющих основу электрических явлений при электрическом пробое трансформаторного масла.

1.1. ПОВЕДЕНИЕ И ДИНАМИКА ПУЗЫРЬКОВ В ЖИДКОСТЯХ

Термодинамическое равновесие между жидкостью и газом в ней. Сначала рассмотрим общие свойства жидкости, содержащей пузырьки газа. Первой задачей является анализ равновесия между жидкостью и газом, если молекулы газа находятся в жидкости. Такая ситуация имеет место, если газ

образуется в жидкости в результате химических процессов или фотопроцессов. При этом, рассматривая равновесие между газом и жидкостью, будем ориентироваться на простейшую систему такого рода, состоящую из воды и кислорода. Жидкость и газ (вода и кислород) в таком случае разделены границей. Газ, просачиваясь через границу раздела, попадает в жидкость и находится далее в связанном состоянии между молекулами жидкости. Если бы жидкость была переведена в кристаллическое состояние, позиции молекул растворенного газа соответствовали бы узлам кристаллической решетки. В результате, рассматривая равновесие между жидкостью и растворенным в ней газом, будем считать, что в жидкости находится определенное число потенциальных ям, попадая в которые молекулы газа оказываются в связанном состоянии. Такое представление позволяет использовать общие подходы термодинамики при анализе растворения газа в жидкости (см. [20]). Растворимость азота и кислорода в воде можно найти, например, в [21].

При данных условиях плотность растворенных молекул в жидкости может быть получена классическим способом как результат распределения определенного числа одинаковых частиц (шаров) по определенному числу одинаковых ящиков (например, [22]), роль которых в рассматриваемом случае выполняют потенциальные ямы, где могут находиться связанные молекулы. Поскольку в каждой потенциальной яме может находиться не более одной молекулы, мы приходим к распределению Ферми-Дирака, которое в пределе, когда температура системы велика, переходит в распределение Больцмана.

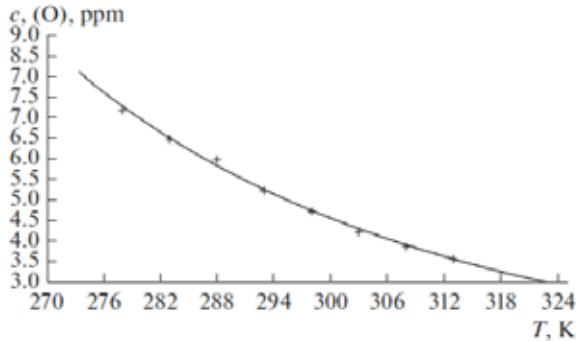
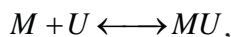


Рис. 1.2. Зависимость от температуры T растворимости кислорода в воде c_s при атмосферном давлении кислорода: кресты – измерения [21], сплошная кривая – расчет по формуле $c_s = 0.013 \exp(1760/T)$.

Указанный предел будет рассмотрен далее. При этом равновесие в данной системе описывается уравнением



где M – молекула газа, U – потенциальная яма для молекулы газа в жидкости, MU – связанное состояние молекулы газа в жидкости. Соотношение между концентрациями свободных молекул $[M]$ и потенциальных ям в жидкости $[U]$ и концентрацией связанных молекул $[MU]$ дается соотношением Саха [23, 24].

$$\frac{[M][U]}{[MU]} = C \exp\left(-\frac{\Delta\varepsilon}{T}\right)$$

Температура T здесь и далее выражена в энергетических единицах, константа C не зависит от концентраций рассматриваемых компонентов и $\Delta\varepsilon$ – энергия связи молекулы, находящейся в потенциальной яме. Это соотношение удобно представить в виде

$$c_s = c_0 p_g \exp\left(-\frac{\Delta\varepsilon}{T}\right), \quad (1.1)$$

где c_s – максимальная концентрация газа, растворенного при данной температуре, c_0 – характерная концентрация для данной системы, p_g – парциальное давление газа на границе раздела в атмосферах. На рис. 1.2 приводится рассматриваемая зависимость для кислорода, растворенного в воде для $c_0 = 0.013$, $\Delta\varepsilon = 1760$. Зависимость (1.1) для концентрации растворенного в воде кислорода хорошо описывает экспериментальные данные.

Проведенный анализ позволяет сформулировать рассматриваемую далее проблему. Если газ находится внутри жидкости, определенная его часть в соответствии с (1) растворяется в нем. Если концентрация молекул газа в жидкости превышает концентрацию растворенного газа, избыток газа выводится из жидкости через границу раздела. Однако этот процесс протекает достаточно долго в лабораторной системе такого рода в силу медленного перемещения молекул газа в жидкости. В частности, коэффициент диффузии молекул кислорода в воде равен $D(\text{O}_2) = 2.4 \times 10^{-5} \text{ см}^2/\text{с}$ [25]. Для характерных лабораторных размеров $L \sim 1 \text{ см}$ это соответствует времени перемещения свободных молекул кислорода до границы раздела $t = L^2/[2D(\text{O}_2)] \sim 10 \text{ ч}$. На основе этого можно сформулировать рассматриваемую проблему. Концентрация газа в жидкости превышает концентрацию растворенного в ней газа, и избыток газа выводится из жидкости через границу раздела. По ходу этого процесса молекулы избыточного газа объединяются в пузырьки, что ускоряет его выход из жидкости благодаря всплыванию пузырьков под действием силы Архимеда. Таким образом, жидкость с находящимися внутри пузырьками является неравновесной системой, где наряду с процессом всплывания пузырьков происходит процесс их объединения при контактах в результате перемещения пузырьков в жидкости. Этот режим развития данной неравновесной системы имеет место при высокой концентрации газа c в жидкости, которая в случае системы кислород–вода при $T = 298 \text{ К}$ составляет $c_s \sim 5 \text{ ppm}$.

Поведение отдельного пузырька газа в жидкости. Хотя рассматриваемая система жидкость–пузырьки является термодинамически неравновесной, в течение малых времен устанавливается определенное равновесие между каждым пузырьком и окружающей его жидкостью. Проанализируем состояние газа внутри соответствующего пузырька. Параметры газовой фазы определяются взаимодействием с жидкостью. Будем считать, что граница раздела соответствующего пузырька имеет сферическую форму. Тогда давление газа p внутри пузырька радиусом r и давление p_s , поддерживаемое в жидкости, связаны уравнением Лапласа [26]

$$p = p_s + p_{ef}, \quad p_{ef} = \frac{2\alpha}{r},$$

где α – коэффициент поверхностного натяжения жидкости, молекулы которой составляют границу раздела между двумя фазами. Обычно жидкость отделяется от газа плоской границей раздела, и тогда p_s представляет собой давление газа, которое передается жидкости. Тем самым в силу сферической формы пузырька давление газа в нем выше, чем в газе за пределами жидкости.

Рассмотрим состояние газа в пузырьках, находящихся в жидкости, на примере взаимодействия пузырьков воздуха в воде. При $T = 298$ К коэффициент поверхностного натяжения воды равен 72 дин/см [25], причем состояние газа внутри пузырьков в воде, согласно приведенным выше формулам, не зависит от сорта газа. Некоторые параметры, описывающие состояние газа в пузырьках, представлены на рис. 1.3а.

Как видно из формулы (2), для микронных размеров пузырьков состояние газа внутри пузырька заметно отличается от состояния газа, находящегося над плоской поверхностью раздела газа и жидкости при атмосферном давлении (рис. 1.3а). Далее введем представленную в соответствии с (5) на рис. 1.3б эффективную концентрацию молекул газа N_0 внутри пузырьков. При этом в пределе $-p_s$ имеем r

$$N_0 r = \frac{2\alpha}{T} = 3,5 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}.$$

Введем также эффективное число n_{ef} молекул газа в пузырьке, связанное с радиусом пузырька r соотношением

$$n_{ef} = \frac{4\pi N_0 r^3}{3} = \frac{4\pi N_0 r}{3} r^2 = \left(\frac{r}{r_0}\right)^2.$$

Для молекул газа, находящихся в воде при комнатной температуре, имеем $r_0 = 0.83$ А. В дополнение к этому рис. 1.3в содержит зависимость числа молекул n в пузырьке данного радиуса. В частности, находящийся в воде пузырек газа радиусом 1 мкм содержит 1.5×10^8 молекул этого газа. Энергия, приходящаяся на одну молекулу газа внутри пузырька, в силу отталкивания молекул газа выше, чем в окружающем газе. Рис. 1.4 дает схематическую энергетическую картину для молекул газа, находящихся в жидкости и около нее.

Кинетика пузырьков газа в жидкости. Кинетика эволюции пузырьков в жидкости определяется ростом пузырьков в жидкости и последующим их всплыванием. Поскольку минимальный размер пузырьков в рассматриваемых дисперсных системах начинается с долей микрон, каждый пузырек по сути дела является новой фазой со сферической границей раздела, через которую свободно проходят молекулы газа. Другим механизмом роста пузырьков является коагуляция, т.е. объединение двух пузырьков с размерами одного порядка величины. Для простых жидкостей, состоящих из молекул той же структуры,

что и сама жидкость, контакт двух пузырьков приводит к разрушению разъединяющей их границы, так что два контактирующих пузырька сливаются. Наряду с указанными процессами роста имеет место дрейф пузырьков вверх под действием силы Архимеда. Поскольку смещение пузырьков вверх значительно превышает их перемещение в результате диффузии, далее проанализируем характер эволюции пузырьков газа в жидкости как самосогласованный процесс, пренебрегая диффузией пузырьков при их движении.

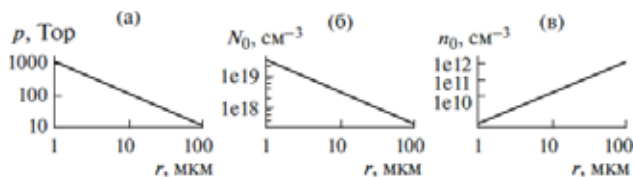


Рис. 1.3. Параметры пузырька воздуха в воде в зависимости от радиуса пузырька: (а) – давление воздуха p внутри пузырька, (б) – концентрация, (в) – число молекул воздуха в пузырьке



Рис. 1.4. Приходящаяся на одну молекулу газа энергия для разных случаев ее нахождения по отношению к жидкости

В рассматриваемом режиме удаление избытка газа из жидкости определяется всплыванием пузырьков. Этот процесс имеет аналогию с падением твердых частиц в газе, где скорость падения и определяется формулой Стокса [26–28]

$$v_{\beta} = \frac{2\rho_p g r^2}{9\eta}.$$

Здесь r – радиус частицы, считающейся сферической, $g = 980 \text{ см}^2/\text{с}$ – ускорение свободного падения, ρ_p – плотность материала частицы, η – коэффициент вязкости газа. Если частица жидкая или движется через жидкость, граничные условия на границе раздела между нею и средой изменяются. Это приводит к изменению коэффициента пропорциональности в формуле (9), которая является силой сопротивления для движения частицы в среде. В частности, если газовая частица движется в жидкости, то сила сопротивления дается формулой Стокса, умноженной на $3/2$ [29]. Приравни-

вая силу сопротивления силе Архимеда, получим для скорости всплывания газового пузырька сферической формы в жидкости

$$v_{\beta} = \frac{\rho_1 g r^2}{3\eta},$$

где r – текущий радиус частицы, ρ – плотность жидкости. Например, для газового пузырька в воде ($\rho = 1 \text{ г/см}^3$; $\eta = 8.9 \times 10^{-3} \text{ г/(см с)}$) получим

$$v_{\beta} = C r^2.$$

Здесь $C = 3.6 \times 10^4 \text{ см}^{-1} \text{ с}^1$. При этих условиях (1.11) также удобно представить в форме

$$v_{\beta} = v_0 n,$$

где $v_L = 2.5 \times 10 \text{ см/с}$. Скорость всплывания газового пузырька с $r = 1 \text{ мкм}$, находящегося в воде, согласно (1.11) равна $v_L = 3.6 \times 10^{-4} \text{ см/с}$. Соответственно время всплывания этого пузырька, находящегося ниже границы раздела на расстоянии $L = 1 \text{ см}$, составляет $\tau_L = L / v_L \sim 50 \text{ мин}$, что дает представление о масштабе рассматриваемого процесса.

Имеются два механизма роста пузырьков в жидкости, которые в конечном итоге приводят к переводу всего газа в жидкости в растущие пузырьки при рассматриваемых условиях, когда полная концентрация газа в жидкости значительно превышает концентрацию растворенного газа. Первый из механизмов отвечает прилипанию находящихся в жидкости отдельных молекул к пузырькам. Во втором случае имеет место коагуляция пузырьков. Скорость прилипания молекул v_{at} к пузырькам радиуса r согласно формуле Смолуховского [30] составляет

$$v_{at} = 4\pi D r N_p,$$

где $N_p = N_b / n$ – концентрация пузырьков, так что средняя концентрация молекул газа, находящихся в пузырьках, равна N_b , и среднее число молекул в пузырьке составляет n . Для простоты считаем, что все пузырьки одинакового размера. Процесс прилипания молекул газа к пузырькам внутри жидкости является необратимым, поскольку свободные молекулы выталкиваются из жидкости. Очевидно, рассматриваемый режим роста пузырьков, когда на первой стадии свободные молекулы внутри жидкости прилипают к ним, а затем происходит рост пузырьков в результате коагуляции, имеет место при выполнении критерия $v_{at} \tau \gg 1$, где τ – характерное время всплывания пузырьков. Данный критерий удобно представить в виде

$$2\pi L^2 r N_p \gg 1.$$

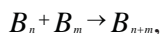
Для пузырька с $r = 1 \text{ мкм}$ этот критерий дает

$$L^2 N_b \gg 4 \times 10^{11} \text{ см}^{-1}.$$

Поскольку полная концентрация газовых молекул, находящихся в пузырьках, должна превышать концентрацию растворенных молекул, следует,

что в случае кислорода, находящегося в воде, указанный критерий выполняется с большим запасом.

Рассмотрим другой механизм роста пузырьков – в результате коагуляции, протекающей по схеме



где B – пузырек в жидкости, а индекс указывает число содержащихся в нем молекул. Данный механизм управляется кинетическим уравнением Смолуховского [31], которое иллюстрирует парную ассоциацию объектов разного сорта, включая ассоциацию пузырьков, причем природа процесса ассоциации одинакова для разных объектов и описывается уравнением (1.3). Будем считать, что каждый контакт двух пузырьков приводит к их ассоциации. Используем аналогию между процессом ассоциации двух пузырьков в жидкости и процессом ассоциации двух кластеров в газе, моделируя кластеры сферическими частицами и считая в рамках модели жидкой капли, что каждый контакт двух кластеров приводит к образованию единого кластера. Тогда константа скорости ассоциации двух пузырьков k_{as} радиусами r_1 и r_2 по аналогии с ассоциацией двух кластеров представлена формулой [32, 33]

$$k_{as} = \frac{2T}{3\eta} \left(\frac{r_1 + r_2}{r_2 r_1} \right).$$

Та же аналогия дает для функции распределения пузырьков по размеру в процессе их роста [32, 33]

$$f_n = \frac{4N_b}{n^{-2}} \exp \left(-\frac{2n}{\bar{n}} \right),$$

где \bar{n} – среднее число молекул в пузырьке.

Заменяя для простоты скобку в (1.4) множителем 2, получим для коэффициента ассоциации

$$k_{as} = \frac{4T}{3\eta}.$$

В случае пузырьков кислорода в воде эта формула дает $k_{as} = 6.1 \times 10^{-11}$ см³/с. Уравнение баланса для роста среднего числа молекул в пузырьке n по аналогии с процессом ассоциации кластеров в газе [32, 33] имеет вид

$$\frac{d\bar{n}}{dt} = \frac{1}{2} k_{as} N_m t.$$

Решение этого уравнения записывается так:

$$\bar{n} = \frac{1}{2} k_{as} N_m t,$$

где N_m – плотность связанных молекул, находящихся в пузырьке.

Отметим, что эволюция пузырьков рассматривается в режиме, когда пузырьки становятся большими и характер их роста в результате коагуляции не зависит от начальных условий. Решая самосогласованную задачу, учи-

тывающую наряду с ростом пузырьков их всплытие под действием силы Архимеда, можно найти параметры пузырьков при пересечении ими границы раздела. В частности, в случае плоской границы раздела между жидкостью и газом, расположенным над жидкостью, с первоначально равномерным распределением газа в жидкости время всплытия образующихся пузырьков, как и их размеры, зависит от начальной концентрации молекул газа в жидкости c и расстояния до границы раздела L . Эти зависимости для воды (рис. 1.5) дают представление о параметрах пузырьков при указанных условиях.

Структуры газовых пузырьков, образуемые в жидкости в электрическом поле. Условно жидкость с пузырьками можно разделить на два класса: когда пленка лопается при контакте двух пузырьков (например, пузырьки в воде) и когда отсутствует объединение пузырьков (см. рис. 1.6) при их контакте (например, пузырьки в органической жидкости).

Хорошо известно, что добавление к воде мыла приводит к образованию пены – совокупности воздушных пузырьков, разделенных пленкой с продолжительным временем жизни. Указанные пленки состоят из амфифильных молекул, которые имеют гидрофобный хвост и гидрофильную голову, т.е. могут рассматриваться как линейные молекулы с положительным зарядом с одной стороны и отрицательным с другой, причем соседние молекулы объединяются так, что заряды «смотрят» в одинаковые стороны. Образованная такими молекулами пленка является мембраной для определенных молекул и может быть достаточно устойчивой. Существование таких молекул было доказано экспериментально Ленгмюром сто лет назад [36–40]. Пленки и мембраны, образуемые из амфифильных молекул, используются в прикладных целях и реализуются в живых системах (например, [41–45]). Далее мы используем сам факт образования структур амфифильных молекул при самосборке таких структур и принимаем как данность то, что присутствие амфифильных молекул в органических или в простых жидкостях в качестве примеси делает возможным образование стабильных пленок. Если газовые пузырьки окружены такой пленкой, т.е. пленкой, которая плохо пропускает газ, рост их при определенных размерах прекращается. Если пузырьки притягиваются друг к другу на малых расстояниях, то при ассоциации они образуют пену с относительно большим временем жизни. Ассоциация таких пузырьков анизотропна: вместо пены образуются цепочечные и нитевидные структуры пузырьков. Если жидкость с такими пузырьками находится во внешнем электрическом поле, оно индуцирует электрические дипольные моменты на пузырьках. Поскольку наведенный дипольный момент пропорционален поляризуемости пузырька, которая пропорциональна его объему, то рассматриваемое взаимодействие существенно для больших пузырьков. Присутствие газовых пузырьков в жидкости облегчает ее электрический пробой, так как некоторая часть ее объема занята газом, а пробой газа происходит при более низких напряженностях электрического поля по сравнению с жидкостью.

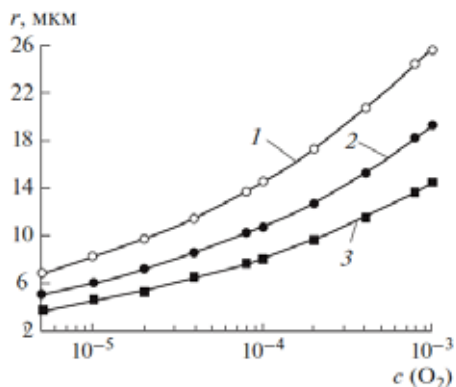


Рис. 1.5. Зависимость среднего радиуса пузырьков r в момент их всплывания от начальной концентрации молекул газа в воде c при разных начальных расстояниях от границы раздела L [34]: 1 – $L = 10$ см, 2–3, 3–1

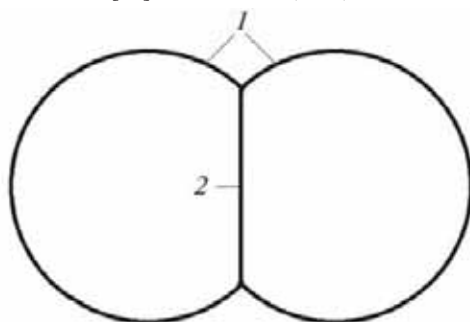


Рис. 1.6. Контакт двух пузырьков в жидкости: 1 – граница пузырьков в жидкости, 2 – пленка, разделяющая контактирующие пузырьки

Однако условия для электрического пробоя еще более облегчаются, если газовые пузырьки образуют цепочечные структуры, служащие каналами прохождения электрического поля при пробое. Очевидно, процесс ассоциации газовых пузырьков в электрическом поле имеет аналогию с этим процессом, протекающим с участием твердых кластеров в газе, где под действием электрического поля образуются нитевидные кластеры, вытянутые вдоль электрического поля (например, [35, 36]). Вероятно, подобный процесс происходит с пузырьками в органической жидкости, где контакт двух газовых пузырьков не приводит к их схлопыванию, поскольку разделяющая их пленка имеет амфифильную природу. Далее рассмотрим ассоциацию газовых пузырьков, ограниченных устойчивой пленкой, в электрическом поле, считая, что процесс сближения и ассоциации пузырьков происходит в результате взаимодействия дипольных моментов, наведенных на пузырьках внешним электрическим полем.

Анализируя отдельный пузырек в органической жидкости как макроскопическую вакансию, имеем для поляризуемости отдельного пузырька [32, 33, 46]

$$\alpha = r^3 \frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 2},$$

где $\varepsilon_r = \varepsilon / \varepsilon_0$ – диэлектрическая постоянная для жидкости. В частности, для типичного трансформаторного масла с $\varepsilon = 2.2-2.3$ [47] эта формула дает $\alpha = 0.4r^3$. При этом потенциал взаимодействия двух пузырьков U как результат взаимодействия наведенных дипольных моментов под действием внешнего электрического поля напряженностью E при расстоянии R между пузырьками составляет

$$U = \frac{\bar{d}_1 \cdot \bar{d}_2 - 3(\bar{d}_1 \cdot \bar{n})(\bar{d}_2 \cdot \bar{n})}{R^3},$$

здесь \bar{n} – единичный вектор, направленный вдоль соединяющей пузырьки оси R , и наведенные дипольные моменты равны $\bar{d}_1 = a_1 E$, $\bar{d}_2 = a_2 E$. Отсюда следует, что пузырьки притягиваются, если $\cos^2 \theta > 1/3$, где θ – угол между E и R . В результате имеем для силы F , действующей между двумя пузырьками радиуса r при расстоянии R между ними:

$$F \sim \frac{E^2 r^6}{R^4}, R \gg r,$$

где было использовано, что $a \sim r$. Оценим характерную скорость сближения пузырьков и, приравняв силу притяжения пузырьков (1.5) к силе трения при их сближении, которая определяется формулой Стокса [27, 28]

$$F = 6\pi r \eta_{fl} v,$$

где η_{fl} – вязкость жидкости. Приравнявая указанные силы, имеем зависимость скорости сближения пузырьков от параметров задачи

$$v \sim \frac{E^2 r^5}{R^4 \eta}.$$

Это ведет к следующей оценке для константы скорости ассоциации пузырьков k_{ind} в результате взаимодействия наведенных дипольных моментов:

$$k_{ind} \sim v R^2 \sim \frac{E^2 r^5}{R^2 \eta}.$$

Отношение констант скоростей в соответствии с рассматриваемыми процессами равно

$$\frac{k_{ind}}{k_{as}} \sim \frac{E^2 r^5 N^{2/3}}{T}.$$

Отсюда следует, что ассоциация пузырьков за счет наведенных дипольных моментов доминирует при условии

$$E^2 r^5 N_b^{2/3} \gg T. \quad (1.6)$$

В частности, при типичном значении напряженности электрического поля $E \sim 1$ кВ/см при минимальном радиусе пузырька $r = 5$ мкм, в котором может уместиться стример, получим при комнатной температуре $N_b \gg 100$ см⁻³, что в случае кислорода или азота соответствует полной концентрации молекул в пузырьках $N_m \gg 4 \times 10^{13}$ см⁻³ при атмосферном давлении. Для сравнения отметим, что концентрация молекул в жидкой воде при этих условиях составляет $\sim 3 \times 10$ см⁻³. Другой критерий для рассматриваемого характера ассоциации пузырьков

$$\xi = \frac{U(r)}{T} \sim \frac{E^2 r^3}{T} \gg 1$$

означает, что потенциал взаимодействия пузырьков при их сближении за счет взаимодействия наведенных диполей значительно превышает их тепловую энергию. При вышеуказанных параметрах имеем $\xi \sim 3 \times 10^4$, т.е. данный критерий выполняется. Отметим, что, если критерии (1.6) и (1.7) справедливы, при ассоциации пузырьков с устойчивой пленкой, разделяющей их, образуются структуры типа цепочек и ниточек, направленных по полю. При невыполнении критериев ассоциация пузырьков с устойчивой границей приводит к образованию пены.

Полученные результаты можно применить к процессам, протекающим в трансформаторном масле, рассматривая его как органическую жидкость, находящуюся в электрическом поле и частично экранирующую его. Однако со временем трансформаторное масло стареет, т.е. составляющие его молекулы разлагаются и окисляются. В результате в трансформаторном масле образуются газовые молекулы, объединяющиеся в пузырьки. Вместе с этим образуются линейные полимерные молекулы, на концах которых сосредоточены заряды. Самосборка этих амфифильных молекул приводит к образованию пленки-мембраны, окружающей газовый пузырек и ограничивающей его рост. Хотя такое описание является схематичным, оно правильно отражает общую картину процессов в трансформаторном масле. При этом процесс формирования структур в данной системе происходит быстро по сравнению с временами электрических явлений.

1.2. ПРОБОЙНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ЖИДКОСТИ, СОДЕРЖАЩЕЙ ГАЗОВЫЕ ПУЗЫРЬКИ

Физические механизмы пробойных и предпробойных явлений. Практический интерес к пониманию физики электрического пробоя в жидкости связан с развитием высоковольтных импульсных энергетических систем, а также совершенствованием изоляции высоковольтных устройств и коммутаторов. В роли изолирующей среды, как правило, выступают жидкие

диэлектрики (минеральные масла, вода, смеси спиртов и глицерина), обладающие высокой пробивной прочностью. Важность исследования предпробойных и пробойных явлений в жидкостях диктуется необходимостью получения предельных мощностей в импульсных накопителях энергии, а также многочисленными применениями жидких диэлектриков в промышленности, технике, медицине и экологии. Электрический пробой в жидкости наблюдается как нарушение ее электрической прочности. В этом случае проводящий плазменный канал образует электрическое соединение между электродами в жидкости, что приводит к развитию искрового или дугового разряда. Пробою, как правило, предшествуют предпробойные явления, связанные с формированием и распространением стримеров, т.е. с образованием слаботоковых проводящих каналов (частичные разряды).

Рассмотрим стримерную фазу развития электрического пробоя или предпробойные явления, так как в большинстве приложений образование дугового разряда является нежелательным. Поскольку электрический пробой рассматривается для жидкости, содержащей газы, пузырьки, присутствие пузырьков в этой системе играет принципиальную роль в развитии электрического пробоя. При этом на распространение электрического сигнала могут повлиять как отдельные пузырьки, так и их структуры с горизонтальными или вертикальными ветвями. Ясно, что развитие стримеров невозможно в пузырьках малого размера, так что минимальный размер пузырька, необходимый для распространения стримера, также является предметом изучения.

Проведенные экспериментальные исследования выявили ряд закономерностей в электрическом пробое жидкостей, основные из которых сводятся к следующему. Электрическая прочность жидкостей увеличивается с увеличением давления [46]. Присутствие в жидкости газовых пузырьков облегчает электрический пробой жидкости, причем для положительной полярности пробойное напряжение обычно ниже, чем для отрицательной [46–48]. Значение напряженности электрического поля, необходимое для развития пробоя, уменьшается с увеличением длины импульса [50]. Стримеры в жидкостях, как правило, характеризуются нитевидной структурой. Предполагается, что стримерные каналы являются областями более низкой плотности, чем жидкость [63], и заполнены газом или парами [50] или являются «трещинами» в жидкости с плотностями, меньшими, чем окружающая жидкость [57].

Развитие электрического разряда непосредственно в жидкости зависит от ряда факторов, в частности, от типа разряда (импульсный, постоянного или переменного тока, радиочастотный или микроволновой), времени нарастания и длительности приложенного импульса, энергии в импульсе, полярности приложенного напряжения, геометрии разрядного промежутка, свойств материала и состояния электродов. Свойства и состояние самой жидкости: ее чистота, проводимость, гидростатическое давление, рН-индекс и температура, существование в ней микропузырьков – также являются важнейшими факторами для электрического пробоя [50, 54, 55]. Жидкости обладают широким спектром проводимости – от солевых растворов до жидкостей с высокой степенью очистки. В некоторых случаях свойства жидкости могут меняться во время разряда (например, ионные продукты реакции могут увеличить проводимость и повлиять на рН-индекс раствора) [126].

Разряды в жидкости можно разделить по механизму развития: электронному, пузырьковому, микровзрывному, электрострикционному и электротепловому. Все эти механизмы в конечном счете можно свести к двум: электронному и пузырьковому. Электронный механизм имеет место при сравнительно коротких импульсах в очень чистых жидкостях, пузырьковый – при более длительных импульсах в загрязненных жидкостях с хорошей проводимостью [51].

Кратко проанализируем эти механизмы. Электронный механизм пробоя наблюдается в очень чистых дегазированных жидкостях при малых наносекундных и субнаносекундных длительностях импульса, создающих высокие электрические поля. Электронный механизм аналогичен механизму пробоя газов, обусловленному ионизацией частиц среды электронным ударом, и типичен для жидкостей с высокой подвижностью заряженных частиц (сжиженные аргон, ксенон, метан) [57]. Наблюдаемое в этом случае формирование в жидкостях тонких плазменных каналов – стримеров имеет тот же характер, что и в газах [60]. В частности, недавние эксперименты с использованием предельно коротких пикосекундных импульсов (ширина импульса – 400 пс, время нарастания – 150 пс) в чистой воде с малой проводимостью (5 мкСм/см) показали, что разряды в воде могут развиваться при отсутствии формирования пузырьков газа [63]. При таких коротких импульсах фазовый переход не успевал произойти. Для импульса в 220 кВ электрическое поле, создаваемое острым (10 мкм) электродом, составляло 220 МВ/см, что значительно превышает поле, необходимое для ионизации в конденсированной фазе (30 МВ/см). Следовательно, плазменные каналы образовывались в результате однократной ионизации при распространении по ним свободных электронов по аналогии со стримерами в газовой фазе [64].

При высоких напряженностях электрического поля и длинных импульсах происходит образование парогазовых пузырьков, сопровождаемое нагревом газа внутри них. Это вызывает образование ударных волн, за фронтом которых может происходить взрывное парообразование. Такой механизм развития разряда в жидкости называется микровзрывным [76].

Пузырьковый механизм электрического пробоя в жидкостях протекает с помощью образования парогазовых пузырьков, формирующих проводящий канал, и обычно осуществляется при более длинных импульсах [65], которые могут привести к нагреву жидкости предпробойными токами и формированию пузырьков, что особенно характерно для жидкостей с высокой проводимостью. С увеличением давления пробивное напряжение недегазированной жидкости возрастает [67]. На этом факте основываются теории, в которых пробой жидкого диэлектрика в конечном итоге связывается с электрическим разрядом в газовых пузырьках [71]. Результаты экспериментов показывают, что повышение давления препятствует образованию областей с пониженной плотностью и, как результат, увеличивает напряжение пробоя [73]. С уменьшением времени импульса пробивное напряжение жидкости, как правило, возрастает. Пробивная напряженность электрического поля приобретает значение характеристики, тесно связанной с природой самой жидкости. Так, типичный порядок пробойного напряжения воды превышает 1 МВ/см для микросекундных импульсов и достигает 30 МВ/см для импульсов длитель-

ностью в сотни наносекунд [130]. Для жидкостей средней степени очистки (технические электроизолирующие жидкости) пробивная напряженность составляет около 10^5 В/см, что на один порядок превышает пробивную напряженность газообразных диэлектриков в нормальных условиях. Не останавливаясь подробно на пузырьковом механизме в данном разделе, отметим, что настоящий обзор связан главным образом с пузырьковым механизмом и дисперсными средами, в которых данный механизм осуществляется. Более подробно он рассмотрен и исследован в следующих разделах.

При больших электрических полях в жидкости может возникнуть электрострикционное давление, связанное с изменением диэлектрической проницаемости жидкости в результате изменения ее плотности. Электрострикция может приводить к разрыву сплошности и образованию полостей и пузырьков в жидкости. Данный механизм называется электрострикционным. Его также часто относят к пузырьковому механизму, хотя образование пузырьков имеет в данном случае иную природу. Электрострикционный механизм развития разряда наблюдался в эксперименте [78]. Эксперимент проводился в воде, этаноле, н-пентане при характерных временах нарастания напряжения 3–5 нс. Для воды разрыв сплошности наступал при электрострикционном давлении 30 МПа, что соответствовало электрическим полям 2×10^8 В/см [79]. Электрострикция может быть эффективным механизмом пробоя в жидкостях с большой диэлектрической проницаемостью [80]. В работе [81] экспериментально и теоретически показано, что начальная стадия наносекундного пробоя в жидкости связана с появлением в ней разрывов (кавитация) под влиянием электрострикционных сил.

При прохождении тока через хорошо проводящую жидкость происходит ее вскипание, так что ионизация происходит в парогазовой фазе, что приводит к развитию проводящего канала. Данный механизм называется электротепловым [89]. Электротепловой механизм может реализовываться при больших значениях произведения удельной электропроводности жидкости на длительность воздействия напряжения [88]. Необходимым условием возникновения пробоя является наличие парогазовых пузырьков, что обеспечивает возможность испарения в толще жидкости. Большое число таких пузырьков, сливаясь, может образовывать газовый мостик между электродами, по которому и происходит пробой.

Исторически сложилось так, что в России основные направления исследований пробоя в жидкости концентрировались главным образом вокруг изучения физической природы пробоя жидкостей, механизмов пробоя и построения соответствующих теорий [89], а за рубежом – большей частью вокруг приложений. При этом физическая природа пробоя в пузырьках или непосредственно в жидкости изучалась по мере необходимости, которая часто возникала при оптимизации технических установок [90]. Разряды в жидкостях часто используются при стерилизации и очистке воды (в частности сточных вод), содержащей химические примеси и органические соединения [91], для разрушения органических загрязнений, таких как текстильные красители [99], для наработки активных частиц [100], для экологических и биомедицинских приложений, в том числе инактивации микроорганизмов [68], а также при обработке поверхностей полимеров, химического синтеза, синтеза нано-

частиц и многих других [107]. Все упомянутые приложения основываются главным образом на искусственном вводе пузырьков в жидкость, т.е. осуществляются в дисперсных средах. Пузырьки тем или иным способом пропускаются через зону разряда между электродами. Для поддержания разряда в пузырьках требуется значительно более низкое напряжение, чем для разряда непосредственно в жидкости. Поэтому насыщение воды пузырьками воздуха приводит к увеличению эффективности очистки жидкости от неорганических и органических загрязнителей, например фенолов. Основной механизм воздействия таких разрядов на органические загрязнители проявляется через химические и фотохимические реакции, включая прямое воздействие ультрафиолетового излучения и ударных волн от разряда на органические молекулы, микроорганизмы и бактерии [110]. В пузырьках нарабатываются активные окислители O , O_3 , а также молекулы и радикалы, такие как водород, пероксид водорода (H_2O_2), молекулярный водород (H_2), радикалы гидроксила OH , что обуславливает заметное увеличение скорости разложения загрязнителей и экономию затраченной энергии. Большинство радикалов, образующихся в пузырьке, постепенно диффундирует в жидкость. Тем самым улучшается реакционная способность таких систем. Для исследования физической природы пробоя или предпробойных явлений, а также для приложений используются различные конфигурации электродов: острие-плоскость, острие-острие, провод-цилиндр, скользящая дуга в контакте с жидкостью, плазменная струя внутри жидкости с инжектированием газа и др. [110]. В зависимости от цели исследований применяются источники переменного [115] и постоянного тока [116], микроволновые [117] или импульсные электрические разряды [118]. Как правило, контакт между газовой и жидкой фазами осуществляется в двух режимах. В первом режиме разряд происходит в газовой фазе и плазма контактирует с водяными кластерами, аэрозолями, капельками жидкости и плоскими поверхностями жидкости [119].

Во втором случае оба электрода погружены в жидкость и плазма формируется либо непосредственно в жидкости, либо в газовых пузырьках и каналах [121]. Для изучения пробоя в пузырьках применялись различные конфигурации: (i) пузырьки, прикрепленные к электроду [136], (ii) инжектированные пузырьки в объеме жидкости [123] и (iii) пузырьки в капиллярной трубке [124]. Разряд в пузырьках представляет особенный интерес для пробоя в дисперсных средах. Пузырьки могут естественно образовываться в жидкости либо искусственно инжектироваться в нее. Обычно они полностью окружены жидкостью, которая в данном случае выступает в качестве диэлектрического электрода, а плазма внутри пузырьков часто распространяется как поверхностный разряд.

Как правило, микропузырьки постоянно существуют в жидкости, несмотря на ее очистку от твердых и жидких примесей и дегазирование электродов. Наличие растворенных газов также играет важную роль в процессе пробоя [124]. Например, рост газовых пузырьков в трансформаторном масле (трансформаторное масло задолго до кипения начинает разлагаться с выделением твердых частиц и газа) может определяться его химическим разложением под влиянием нагрева. В достаточно сильном электрическом поле в газовых пузырьках, которые содержатся в масле, могут возникать

электрические разряды, вызывающие разложение масла, в результате чего газовые пузырьки будут расти. Если пузырек газа находится на электроде, он может заряжаться одноименным с электродом зарядом, что приводит к деформации пузырька и может вызвать его отрыв от электрода. Определенные точки поверхности электрода будут являться источниками потока газовых пузырьков, что и наблюдается на опыте.

В экспериментах одним из самых простых способов получения микропузырьков является локальный нагрев пропусканием тока через проволочный электрод. Основное влияние на появление пузырьков оказывает газ, растворенный в воде и адсорбированный на поверхности электрода. Например, в [144] проанализирована роль пузырьков, существующих на электродах до начала пробоя. При проведении эксперимента наблюдалась их деформация, а также переход разряда в жидкость. В экспериментах [125] паровые пузырьки образовывались путем нагрева около электрода в коаксиальной разрядной трубке. Такой разряд особенно привлекателен для очистки воды, так как пузырек наполнен преимущественно парами воды, а не воздухом, обычно используемым для очистки. При этом отсутствует воспроизводство азот- и кислородсодержащих радикалов, ведущих к увеличению кислотности воды. Полученная таким образом парогазовая плазма преимущественно содержит нужные радикалы OH и H , а процессы, приводящие к увеличению кислотности воды, отсутствуют.

Пробой непосредственно в жидкости характеризуется большими значениями пробойной полей. Так, в воде такие поля превышают 1–30 МВ/см, что либо ограничивает применение разрядов для очистки жидкостей, либо играет положительную роль при использовании жидкости в качестве изолирующей среды. В первом случае практическое решение проблемы заключается в искусственном инжектировании газовых пузырьков в жидкость. На этом эффекте основаны многие технологии сегодняшнего дня [126]. Наличие газовой фазы в пузырьке уменьшает пробойное напряжение, облегчает инициирование разряда и увеличивает полезную площадь соприкосновения плазма-жидкость, что способствует быстрому проникновению радикалов в объем жидкости. Коробейников с соавторами [48] исследовали разряды в воде с искусственно созданными долгоживущими микропузырьками размером 40–100 мкм. Было показано, что разряды могут распространяться вдоль цепочки пузырьков. Достаточно плотный ансамбль из пузырьков может стимулировать перескакивание стримерного разряда из пузырька в пузырек. Поле в самом газовом пузырьке может значительно усиливаться по сравнению с приложенным полем. Такое усиление определяется формой пузырька и может быть очень большим при больших радиусах кривизны [131]. Следует отметить, что разряд инициируется в пузырьке и (в зависимости от размеров пузырька и других факторов) либо имеет филаментарную структуру в объеме пузырька, либо распространяется вдоль внутренней границы пузырька по границе раздела газ-жидкость. Инжектированные пузырьки обычно наполняются различными газами. Так, например, в [132] изучался пробой в пузырьках, заполненных аргоном, гелием или кислородом, а в [135] плазма генерировалась в пузырьках, наполненных воздухом, и поработанные радикалы использовались для очистки воды. Панов и др.

[116] экспериментально изучали электрическую прочность трансформаторного масла при пропускании пузырьков, заполненных воздухом или гексафторидом серы. Авторы этой работы показали, что такой метод приводил к уменьшению порога пробоя на 34 и 19 % соответственно.

Экспериментальное исследование электрического пробоя в одиночном пузырьке. В экспериментах по генерации плазмы в пузырьках исследовались изолированные пузырьки и пузырьки, прикрепленные к электродам. Было показано, что заряд в них может достигать значительных величин и вызывать быстрое движение пузырька около электродов. Наблюдались также физические деформации пузырьков. В экспериментах [136] пузырьки были прикреплены к поверхности электрода или генерировались в виде потока пузырьков, поднимающихся между электродами. Например, в [138] наблюдались различия во внешнем виде разряда в пузырьках, фиксированных к поверхности электрода и заполненных различными газами. В молекулярных газах (N_2 или O_2) разряд преимущественно скользил по внутренней поверхности пузырька, а на его поверхности появлялись волнообразные возмущения. Аналогичный тип распространения разряда наблюдался в расчетах [139]. Однако для благородных газов разряд распространялся как объемный разряд внутри пузырька. В этом случае пузырек часто лопался с образованием меньших пузырьков. При увеличении напряжения от 15 до 30 кВ наблюдались большие деформации. При 30 кВ пузырек часто взрывался с образованием более мелких пузырьков. Осцилляции пузырька и волнообразные возмущения на его поверхности наблюдались и в работе [139] в импульсном режиме, а стримеры распространялись по поверхности, в точности повторяя ее изгибы.

Другой подход к изучению изолированного одиночного пузырька в жидкости основан на использовании акустической ловушки. Пузырек в такой ловушке стационарно удерживается внутри жидкости в узлах акустического поля, создаваемого пьезоэлектрическим элементом [140]. При этом левитированный пузырек очень стабилен. Электроды помещаются вокруг пузырька, не касаясь его. Экспериментальная установка, используемая для левитации пузырька, описана в [147]. В этих экспериментах изучались пузырьки диаметром 0.4–0.7 мм в узле акустической стоячей волны, а приложенное напряжение составляло 10–14 кВ. Наблюдались две моды образования плазмы. В первом случае непосредственно в жидкости развивался стример, который касался поверхности пузырька и инициировал в нем разряд. Траектория стримера искривлялась по направлению к поверхности пузырька. Этот стример также инициировал неустойчивости на границе пузырька. Во втором случае плазма генерировалась в изолированном пузырьке только под действием сильного внешнего электрического поля.

Изучение деформации пузырьков под действием электрического поля, осцилляций на их поверхности, изменения формы и давления внутри пузырьков – отдельная важная область исследования, позволяющая управлять пробойными явлениями в жидкости. Деформация газового пузырька под действием электрического поля может происходить как при постоянном, так и при увеличивающемся объеме, например, за счет высасывания газа из электрода. В серии работ Коробейникова и др. [148] выполнены исследования образования долгоживущих микропузырьков размером 20–100 мкм в воде с

помощью импульсно-нагреваемого проволочного электрода. Оптические исследования поведения пузырьков в сильном импульсном электрическом поле до 300 кВ/см показали, что они вытягиваются в направлении поля, сжимаются в поперечном направлении, на их поверхности возникают неустойчивости, перетяжки, пузырьки отрываются от электрода и перемещаются в промежутке. Авторы также наблюдали отличие в поведении анодных и катодных пузырьков. Созданные ими теории позволяют на полуколичественном уровне объяснить ряд экспериментальных данных по электрическому пробую.

Деформация пузырька в электрическом поле может привести к локальному усилению поля внутри пузырька и тем самым способствовать пробую. Так, в экспериментах [147] деформация пузырька приводила к многократному усилению поля внутри него. Авторы оценивают предельный коэффициент усиления поля от 10 до 50 (в зависимости от отношения продольного размера пузырька к поперечному). Давление внутри пузырька может также существенно изменяться на достаточно малых временах. Практическое использование этих двух эффектов – формы и давления, способствует существенному снижению приложенного напряжения.

Электрический пробой в жидкости, содержащей цепочки пузырьков.

Размер и взаимное расположение пузырьков в жидкости играют важнейшую роль в процессе ветвления стримеров. Разряд может распространяться вдоль цепочки пузырьков и в конечном итоге замыкать промежуток между электродами. Так, в экспериментах [148] показано, что стримерный разряд может перескакивать из пузырька в пузырек, как по газовому мостику между электродами, по которому и происходит пробой. Экспериментальные наблюдения перескакивания стримера из пузырька в пузырек также наблюдались в [150]. В этих экспериментах воздушный пузырек диаметром 2 мм помещался между параллельными электродами. При приложении высокого напряжения (9.62 кВ) пузырек распался, и зазор между электродами был наполнен более мелкими пузырьками. В результате наблюдались стримеры, которые резко петляли от одного пузырька к другому, причем канал разряда имел четко выраженную зигзагообразную форму. Его эффективная длина примерно в 1.5–2 раза превышала расстояние между электродами. В других случаях наблюдался распад токового канала на множество светящихся отрезков. Такой зигзагообразный способ распространения напоминал эстафету, в которой один пузырек передавал стример другому.

Экспериментаторы [151] изучали наносекундный разряд в дистиллированной воде с множеством воздушных пузырьков. Они показали, в частности, что разряд, инициированный в одном пузырьке, зажигает разряд в соседнем, находящемся в непосредственной близости от первого. Они также наблюдали перескакивание разряда по цепочке из трех пузырьков.

Моделирование электрического пробоя в жидкости с пузырьками.

Разряд в газовой фазе при контакте с жидкостью характеризуется наличием поверхности жидкости, функционирующей в качестве дополнительного электрода. Именно наличие границы газ-жидкость обуславливает сложную физику и химию таких разрядов, а математические модели и компьютерные расчеты динамики плазмы основываются на идеях, разработанных для газовой фазы [152]. Пузырьки обычно содержат заряды, величина которых зави-

сит от способа их образования (трение) и свойств жидкости (проводимости и степени ее загрязнения). В свою очередь развитие разряда в пузырьках критически зависит от наличия и величины начального заряда. При этом диаметр пузырька определяет возможность лавинно-стримерного перехода. Если диаметр слишком мал, чтобы удовлетворить критерию пробоя Мика, стример в пузырьке не образуется [64]. Условия пробоя для пузырьков, погруженных в жидкость, до настоящего времени не изучались. В данном разделе исследуется развитие стримеров в пузырьках, погруженных в жидкость с различной диэлектрической проницаемостью. Показано, что разряд в пузырьках развивается аналогично разряду в диэлектрическом барьерном разряде, где диэлектриком является окружающая жидкость. Лавинно-стримерный переход и формирование стримера в однородном электрическом поле определяются величиной приложенного напряжения и параметром pd (размер пузырька на давление внутри него), а также зависит от расположения и величины исходных свободных зарядов внутри пузырька. Стримеры не образуются в пузырьках небольшого размера при малом начальном заряде и малых приложенных полях. Результаты данного исследования могут быть полезны для оценки наименьшего исходного заряда, необходимого для развития стримера внутри пузырька данного размера.

Описание модели. Для расчетов использовалась вычислительная платформа *nonPDPSIM*, подробно описанная в [158]. Код *nonPDPSIM* позволяет решать уравнения переноса для всех заряженных и нейтральных частиц с учетом фотоионизации совместно с уравнением Пуассона и уравнением для плотности зарядов на границе плазма–жидкость. Транспортные параметры и константы реакций с участием электронов брались из решения уравнения Больцмана для функции распределения электронов по энергиям. Пузырьки заполнены влажным воздухом при атмосферном давлении ($N_2/O_2/H_2O = 79.5/19.5/1$) и температуре 300 К. Кинетическая модель включает в себя 24 частицы (электроны, ионы, радикалы) и 256 реакций. Часть расчетной области показана на рис. 1.7.

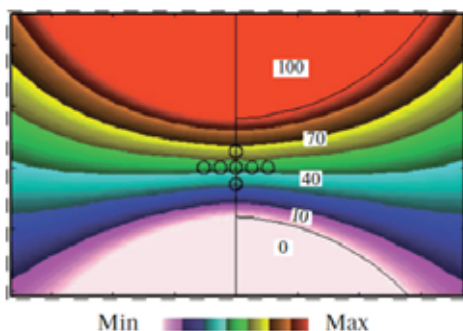


Рис. 1.7. Часть расчетной области. Контурные – начальное распределение потенциала (кВ/см) в момент времени 0.1 нс

Расчеты проводятся на неструктурированных сетках с треугольными элементами. Разряд инициируется в цепочках пузырьков, расположенных между двумя электродами. К верхнему электроду прикладывается напря-

жение 100 кВ с временем нарастания импульса 0.1 нс. Расстояние между электродами – 0.8 см. В месте расположения пузырьков создается однородное электрическое поле. При этом плазменная область внутри пузырька исследуется на сетках с большим разрешением, чем окружающая жидкость.

Стримерные разряды подробно исследованы еще в 1940-х годах в трудах Мика [156] и Леба [157]. Стример представляет собой тонкий цилиндрический канал, который может быть разделен на очень узкую фронтальную зону (головку) и плазменный канал, соединяющий головку стримера с электродами. В головке стримера, благодаря разделению зарядов, возникают большие электрические поля, в которых и происходит ионизация газа. Плазма в канале стримера квазинейтральна, а пространственный заряд сосредоточен на границе. Концентрация электронов в канале стримера атмосферного давления достигает 10^{14} – 10^{15} см⁻³. При атмосферном давлении диаметр положительного стримера – порядка 100–200 мкм (размеры отрицательного стримера обычно значительно больше). Стримеры в пузырьках, погруженных в жидкость, имеют свои особенности. На границе раздела жидкость–газ происходит преломление линий электрического поля. Это часто приводит к тому, что стример начинает распространяться по поверхности пузырька. Поляризация пузырька во внешнем электрическом поле – еще один важный фактор, влияющий на развитие стримера в пузырьке. Электрическое поле в полости пузырька усиливается в 1.2 и 1.33 раза для жидкостей с $\epsilon/\epsilon_0 = 2$ и 4 соответственно. Для жидкостей с $\epsilon/\epsilon_0 > 16$ поле усиливается в 1.5 раза. Поляризованное поле вне пузырька напоминает поле диполя, ориентированного вдоль направления приложенного электрического поля. Развитие стримера внутри пузырька зависит от величины и положения начального заряда. Пространственный заряд при лавинно-стримерном переходе для пузырьков радиусом 500, 400 и 300 мкм, погруженных в жидкость с $\epsilon/\epsilon_0 = 2$ и 80, показан на рис. 1.8.

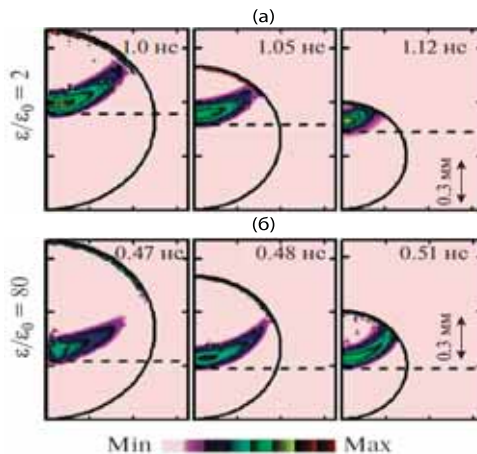


Рис. 1.8. Положение положительного пространственного заряда при лавинно-стримерном переходе для пузырьков радиусом 500, 400 и 300 мкм, (а) – жидкость с $\epsilon/\epsilon_0 = 2$, (б) – 80

Приложенное поле $E_0 = 110$ кВ/см, пространственная плотность заряда – 10^{12} – 10^{13} см⁻³. Если путь лавины превышает диаметр пузырька, то стример

в нем не развивается и для его развития необходимы более высокие поля и/или большие начальные заряды. Расстояния, проходимые лавиной до ее перехода в стример, в зависимости от приложенного поля показаны на рис. 1.9 для пузырька радиусом 500 мкм и двух значений начального (существующего до начала воздействия поля) заряда $Q_1 = 40$ и электронно-ионных пар $Q_2 = 1.1 \times 10^4$. Для жидкостей с низкой диэлектрической проницаемостью кривые лежат в области сильных электрических полей. Для жидкостей с высокой диэлектрической проницаемостью ($\epsilon/\epsilon_0 = 16$ и 80) в случае переходов лавины в стример требуются меньшие поля. Для жидкостей с низкой диэлектрической проницаемостью или слабых полей существует большое расхождение между кривыми, соответствующими зарядам Q_1 и Q_2 . С увеличением напряженности приложенного поля или диэлектрической проницаемости жидкости эта разница исчезает. С уменьшением радиуса пузырька имеется тенденция к насыщению заряда.

Результаты настоящего исследования могут быть полезны для оценки наименьшего возможного начального заряда, необходимого для развития стримерного пробоя внутри пузырька.

Моделирование распространения стримера из пузырька в пузырек.

В данном разделе описан механизм распространения стримера из пузырька в пузырек (минуя жидкую фазу) методом численного моделирования. Исследовались вертикальные (вытянутые вдоль вектора электрического поля) и горизонтальные цепочки пузырьков (расположенные в поперечном направлении к полю). Цепочки пузырьков, наполненных влажным воздухом, помещались в трансформаторное масло ($\epsilon/\epsilon_0 = 2$) и воду ($\epsilon/\epsilon_0 = 80$). Таким образом исследуется два предельных случая поляризации пузырьков в жидкостях с низкой и высокой диэлектрическими проницаемостями.

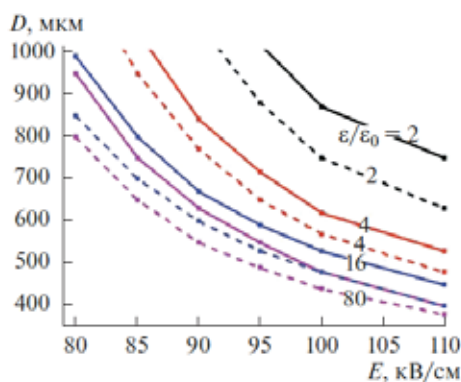


Рис. 1.9. Расстояния D , проходимые лавиной до ее перехода в стример, в зависимости от приложенного поля E для пузырька радиусом 500 мкм: сплошные кривые – начальный заряд Q_1 , электронно-ионных пар, пунктирная – Q_2

Разряд инициируется в цепочках пузырьков, расположенных между двумя электродами. К верхнему электроду прикладывается напряжение 100 кВ со временем нарастания импульса 0.1 нс. Расстояние между электродами – 0.8 см. Таким образом, в месте расположения пузырьков создается од-

нородное электрическое поле $E_0 = 120$ кВ/см. Пузырьки полностью погружены в жидкость, и радиусы пузырьков – 500 мкм. Ориентация цепочки и расстояние между пузырьками определяют эволюцию стримеров и возможность их инициирования в соседних пузырьках. Во внешнем однородном поле внутри изолированного пузырька также однородно и усиливается в 1.2 раза в трансформаторном масле и в 1.5 раза в воде (по сравнению с внешним полем). Когда пузырьки выстраиваются в цепочки, их взаимная поляризация приводит к резкой неоднородности поля внутри пузырьков. В вертикальных цепочках пузырьки ориентированы друг к другу как полюс к полюсу. В итоге поле внутри пузырьков ослабляется (по сравнению с полем изолированного пузырька). В горизонтальной цепочке пузырьки ориентируются друг к другу как экватор к экватору и поле внутри пузырьков усиливается. Расстояние между пузырьками определяет возможность перескакивания разряда из пузырька в пузырек. Высокие электрические поля в головке стримера могут проникать через слой жидкости и усиливать поле в соседнем пузырьке. Следует заметить, что область сильного электрического поля около фронта стримера имеет размеры порядка радиуса стримера, т.е. 100–200 мкм. Исходя из этого, исследовались пузырьки, разделенные слоем жидкости в 1, 100, 200 и 300 мкм. На малых расстояниях (менее 300 мкм) пузырек может «чувствовать» приближение стримера в соседнем пузырьке и соответствующее усиление поля. Для расстояний, превышающих 300 мкм, влияние электрического поля от соседнего стримера уже незначительно. Заметим, что расстояние перескакивания пузырьков (300 мкм) является характерным расстоянием только для рассмотренных больших пузырьков. Для пузырьков других размеров это расстояние, очевидно, будет другим.

Вертикальная цепочка пузырьков. В этом разделе рассмотрим вертикальную цепочку из трех пузырьков, ориентированную вдоль вектора внешнего электрического поля. Распределение электрического поля внутри и около пузырьков представлено на рис. 1.10 для внешнего поля 120 кВ/см в момент окончания нарастания импульса 0.1 нс.

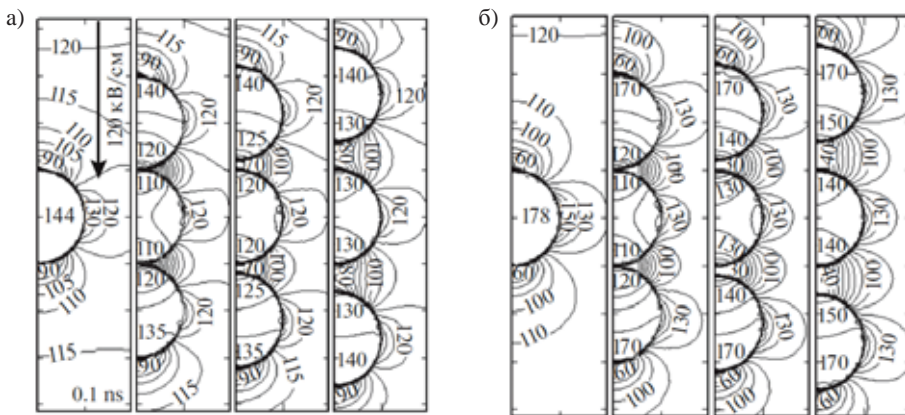


Рис. 1.10. Распределение электрического поля для изолированного пузырька и цепочки из трех вертикальных пузырьков, разделенных слоем жидкости в 1, 100 и 300 мкм: а) трансформаторное масло, б) вода; цифрами указаны значения поля в кВ/см

Для вертикальной цепочки пузырьков, ориентированных вдоль внешнего поля, когда каждый из них ориентирован друг к другу полюс к полюсу, поле внутри уменьшается по сравнению с изолированным пузырьком. Этот эффект наиболее ярко выражен для цепочки, погруженной в воду. Так, электрическое поле в среднем пузырьке уменьшается от 178 кВ/см (изолированный пузырек) до 140, 130 и 110 кВ/см для расстояний 300, 100 и 1 мкм соответственно. Дальнейший сценарий развития разряда в среднем и нижнем пузырьках зависит от расстояния между пузырьками. Стример не может перескочить через достаточно толстый слой жидкости, так как поле стримера быстро уменьшается с расстоянием. Однако для малых расстояний между пузырьками перескок или инициирование стримера в ближайшем пузырьке может иметь место. Поле в ближайшем пузырьке является суперпозицией поляризационного поля, которое частично уменьшается, как показано на рис. 1.10, и поля от пространственного заряда приближающегося стримера в соседнем пузырьке.

Эволюция концентрации электронов внутри цепочки из трех пузырьков, разделенных слоем жидкости в 1, 100, 200 и 300 мкм, показана на рис. 1.11. После лавинно-стримерного перехода и формирования стримера в верхнем пузырьке сильное электрическое поле головки стримера проникает через слой жидкости в средний пузырек и инициирует новый стример. Стример в среднем пузырьке (а) в свою очередь инициирует разряд в нижнем пузырьке. Таким образом, стример может перескакивать из пузырька в пузырек, не распространяясь непосредственно в жидкой фазе.

Перескок стримера наблюдается также для цепочек, разделенных слоем жидкости 200 мкм, хотя время, необходимое для развития стримеров в нижних пузырьках, возрастает. Однако уже для разделяющего пузырьки слоя жидкости в 300 мкм стримеры в нижних пузырьках не развиваются.

Результаты моделирования для пузырьков, погруженных в воду, дают примерно такое же значение (300 мкм) критического расстояния между ними, при котором перескакивание стримера уже невозможно. Это примерно то расстояние, на котором существенно уменьшается величина электрического поля пространственного заряда стримера.

Горизонтальная цепочка пузырьков. В этом разделе рассмотрим горизонтальную цепочку из трех пузырьков, ориентированную поперек вектора внешнего электрического поля. Контуры электрического поля внутри и вокруг изолированного пузырька и цепочки из трех пузырьков, ориентированных перпендикулярно к полю и разделенных слоем воды в 1, 100 и 300 мкм для внешнего поля 120 кВ/см в момент окончания нарастания импульса 0.1 нс, показаны на рис. 1.12. Электрическое поле около экватора изолированного пузырька выше, чем у полюсов. Когда пузырьки выстраиваются в горизонтальную цепочку полюс к полюсу, поле внутри пузырьков усиливается благодаря их взаимной поляризации. Так, например, для пузырьков, разделенных слоем жидкости в 100 мкм, поле внутри может превышать 400 кВ/см. С увеличением расстояния между пузырь-

ками оно более однородно. В предельном случае больших расстояний пузырьки можно рассматривать как изолированные, с напряженностью поля 178 кВ/см. Эволюция плотности электронов и положительного пространственного заряда для горизонтальной цепочки пузырьков в воде показана на рис. 1.13. Расстояние между пузырьками – 100 мкм. Стример сначала развивается в первом пузырьке как объемный разряд (0.18 нс). Сильное электрическое поле этого стримера инициирует разряд в среднем пузырьке (0.18–0.20 нс). Стримеры в среднем пузырьке развиваются как поверхностные разряды, одновременно стартующие из областей, наиболее близких к экватору, т.е. из областей с сильным электрическим полем. Поверхностные стримеры скользят по правой и левой границам пузырька и сливаются у нижней. В крайнем правом пузырьке стример начинает развиваться в момент времени 0.21 нс. Он также стартует из области, близкой к экватору, где поле усилено. Однако для этого пузырька стример скользит исключительно по левой границе, так как на правой поле ослаблено (отсутствует соседний пузырек справа и нет соответствующего поляризованного усиления поля). Заметим, что в горизонтальных цепочках пузырьков стримеры развиваются и при расстояниях между пузырьками 500 мкм и более. В данном случае поляризованное усиление поля играет большую роль, чем поле от пространственного заряда стримера. Этот результат и есть главное отличие механизма перескакивания стримеров в вертикальных и горизонтальных цепочках.

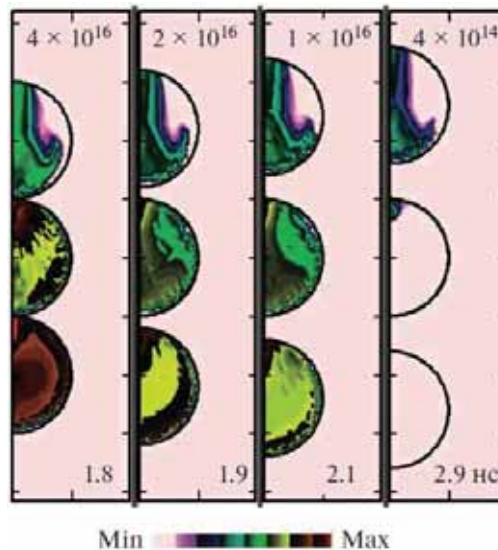


Рис. 1.11. Эволюция электронной плотности (см^{-3} , логарифмическая шкала) в вертикальной цепочке из трех пузырьков, разделенных слоем жидкости в 1, 100, 200 и 300 мкм, внешнее поле $E_0 = 120$ кВ/см; максимальное значение плотности электронов в каждый момент времени указано на рисунке

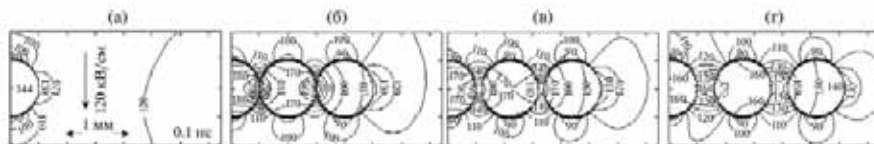


Рис. 1.12. Распределение электрического поля для изолированного пузырька (а) и цепочки из трех горизонтальных пузырьков, разделенных слоем воды: (б) – 1, (в) – 100 и (г) – 300 мкм во внешнем поле 120 кВ/см; цифрами указаны значения поля в кВ/см

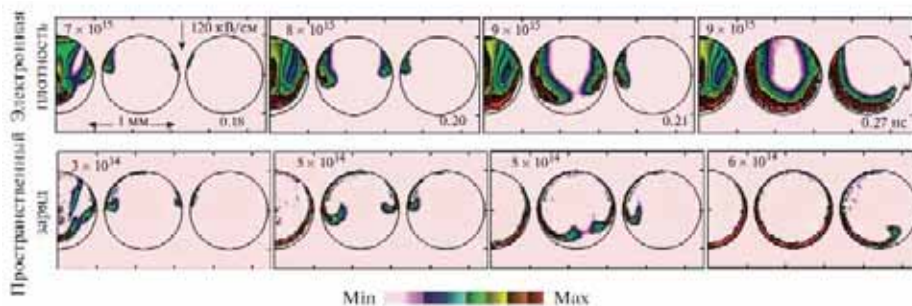


Рис. 1.13. Эволюция плотности электронов (см⁻³, логарифмическая шкала) и положительного пространственного заряда (см⁻³, логарифмическая шкала) в горизонтальной цепочке пузырьков в воде

Предпробойные явления в кластерах из пузырьков. В данном разделе рассмотрены два вида кластеров: 1) кластеры из семи пузырьков с преобладанием горизонтальной ветви, перпендикулярной к направлению электрического поля, и 2) упорядоченная структура из пятнадцати пузырьков, находящихся на одинаковом расстоянии друг от друга. Из-за взаимной поляризации пузырьков процесс перескакивания стримеров из пузырька в пузырек происходит по-разному в цепочках с преобладанием горизонтальной ветви и в кластерах с упорядоченной структурой. Поляризация горизонтальной ветви пузырьков (ориентированных экватор к экватору по отношению друг к другу) приводит к усилению электрического поля внутри них по сравнению с полем в изолированном пузырьке. Характер развития разряда зависит от диэлектрической проницаемости жидкости. В трансформаторном масле ($\epsilon/\epsilon_0 = 2$) разряд развивается в каждом отдельном пузырьке как объемный. В воде ($\epsilon/\epsilon_0 = 80$) стримеры развиваются преимущественно по поверхности пузырька.

Для кластеров из пузырьков оба эффекта (расстояние между пузырьками и поляризационное усиление поля) играют важную роль. При этом степень усиления поляризованного поля зависит от того, сколько соседних пузырьков, ориентированных экватор к экватору, окружает данный пузырек. При прочих равных условиях стример преимущественно развивается в пузырьках с большим полем. Кластеры с преобладанием горизонтальных ветвей из пузырьков могут способствовать ветвлению стримеров в жидкости. Разряд инициируется в цепочках пузырьков, расположенных между двумя

электродами. К верхнему электроду прикладывается напряжение 100 кВ со временем нарастания импульса 0.1 нс. Расстояние между электродами – 0.8 см. Таким образом, в месте расположения пузырьков создается однородное электрическое поле $E_0 = 120$ кВ/см. Расчет проводится на неструктурированных сетках с треугольными элементами. Сетка состоит из примерно 16000 узлов, причем около 13500 узлов находится в плазменной области (в пузырьках). Для инициации стримера у верхней, правой или нижней границ пузырька помещалось квазинейтральное облачко затравочных зарядов (электронов и ионов N^+). Важно подчеркнуть, что заряды иницированы таким образом, что стример в верхнем пузырьке развивается всегда. Однако при отсутствии верхнего пузырька стример в среднем и нижнем пузырьке не формируется. Пузырьки полностью погружены в жидкость и радиусы пузырьков – 500 мкм.

Кластеры из семи и пятнадцати пузырьков в трансформаторном масле. Распределение электрического поля внутри и около пузырьков представлено на рис. 1.14 для кластера из семи и пятнадцати пузырьков, помещенных в трансформаторное масло. Расстояние между пузырьками – 300 мкм. Внешнее поле однородно и направлено сверху вниз. Для сравнения показано распределение электрического поля для одиночного пузырька. В жидкости с $\epsilon/\epsilon_0 = 2$ электрическое поле в полости одиночного пузырька усиливается в 1.2 раза. Поляризационное поле вне пузырька напоминает поле диполя, ориентированного вдоль направления приложенного электрического поля.

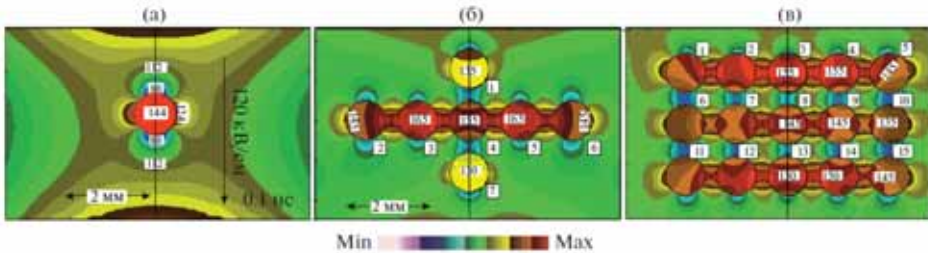


Рис. 1.14. Электрическое поле в момент времени 0.1 нс для одиночного пузырька – (а), кластера из 7 пузырьков с преобладанием горизонтальной ветви – (б) и кластера из 15 упорядоченных равноудаленных пузырьков – (в); цифрами внутри пузырьков указаны значения поля в кВ/см

Кластер из семи пузырьков (рис. 1.14б) состоит из вертикального столбца (пузырьки 1, 4, 7) и горизонтальной ветви (пузырьки 2–6). Добавление к одиночному пузырьку (например, к центральному пузырьку 4) пузырьков 2, 3 и 5, 6, ориентированных экватор к экватору, усиливает электрическое поле внутри горизонтальной ветви. Напротив, пузырьки 1 и 7 немного уменьшают поле вдоль вертикальной ветви. Таким образом, наибольшее усиление поля возникает в пузырьках 3 и 5 (165 против 144 кВ/см в одиночном пузырьке). В кластере из пятнадцати равноудаленных пузырьков электрическое поле мало меняется от пузырька к пузырьку (рис. 1.14в). В этом

случае каждый пузырек окружен примерно одинаковым числом полюсов (ослабляющих поле) и экваторов (усиливающих поле). Поле немного выше в пузырьках верхнего и нижнего рядов из-за отсутствия соседних пузырьков сверху или снизу, т.е. отсутствия полюсов, понижающих поле. В предельном случае кластера с бесконечным числом вертикальных и горизонтальных строк поля внутри каждого пузырька должны быть одинаковыми.

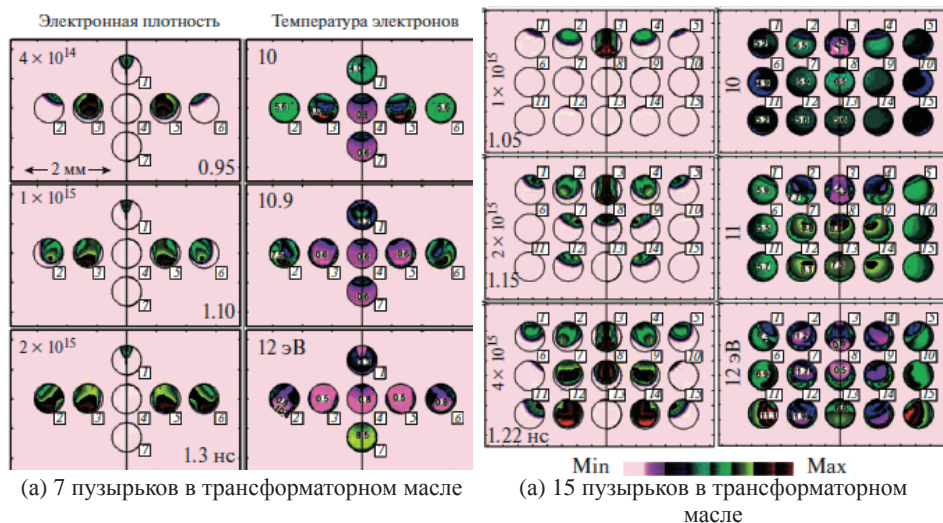


Рис. 1.15. Эволюция плотности (см⁻³, логарифмическая шкала) и температуры электронов (эВ) для кластеров в трансформаторном масле. Максимальное значение плотности и температуры электронов в каждый момент времени указано на рисунке; цифры внутри пузырьков-локальные значения температуры электронов

Эволюция концентрации и температуры электронов для кластеров из семи и 15 пузырьков в трансформаторном масле показана на рис. 1.15. Для кластера из семи пузырьков разряд последовательно развивается через пузырьки 1–(3, 5)–(2, 6). Такая последовательность развития разряда обуславливается наличием повышенного поляризационного поля в указанных пузырьках. Разряд не развивается (на данных временах) в вертикальной цепочке 1–4–7 из-за частичной экранировки поля горизонтальной цепочкой. Стримеры «предпочитают» пузырьки с первоначально высокими напряжениями электрического поля. Обратим внимание, что время задержки между разрядами в разных пузырьках не превышает 0.2 нс. Таким образом, наблюдается горизонтальное ветвление стримера. Температура электронов на фронте стримера достигает 10 эВ и падает до 0.5 эВ после того, как стример приближается к границе пузырька и экранирует внешнее поле. Для кластера из 15 пузырьков разряд практически одновременно развивается в верхней ветви, затем в пузырьках 7 и 9 средней ветви и, наконец, в пузырьках 11, 12, 14, 15 в нижней ветви. Разряд в пузырьке 13 на указанных временах не развивается из-за экранировки поля разрядами в соседних пу-

зырьках. Заметим, что температура электронов ко времени 1.22 нс во всех пузырьках достаточно высока.

Электрический пробой при образовании нитевидных структур пузырьков. Перед пробоем жидкости в приэлектродных слоях часто возникает муть, обусловленная мельчайшими пузырьками газа. Их появление можно объяснить повышенным локальным парообразованием из-за нагрева жидкости. Большое число таких пузырьков, сливаясь, может образовать газовый мостик между электродами, по которому и происходит пробой. Если жидкость с микропузырьками находится во внешнем электрическом поле, в силу взаимодействия наведенных диполей микропузырьки могут образовывать нитевидные структуры. Представляет интерес исследование того, как разряд распространяется по таким структурам. Образование нитевидных структур определенных размеров может существенно облегчить электрический пробой дисперсной системы. В данном разделе исследована динамика распространения стримеров по нитевидным структурам и найден минимальный размер структуры, при котором стример не распространяется. Часть расчетной области с неструктурированной сеткой показана на рис. 1.16. Эволюция электронной плотности и пространственного заряда в цилиндрических нитевидных каналах с радиусом канала 20 и длиной 500 мкм показана на рис. 1.17. Канал помещен в трансформаторное масло. Заметим, что в данном исследовании использовалась плоская версия кода *nonPDPSIM*. В действительности каналы представляют собой параллелепипеды, бесконечно вытянутые в плоскости, перпендикулярной плоскости рисунка.

Квазинейтральное облачко затравочных зарядов (электронов и ионов) помещалось в левой части нитевидного канала. По мере дрейфа облачка и при выполнении критерия Мика происходит лавинно-стримерный переход (в момент времени 1.22 нс). Формируется положительный стример, бегущий влево, и отрицательный стример, распространяющийся в противоположном направлении. В данном случае формирование отрицательного стримера не закончено из-за малой длины трубки. Сформировавшийся положительный стример распространяется влево до конца нитевидной структуры. Он откладывает положительный заряд на стенках трубки, как показано на рис. 1.17.

Дальнейшие исследования показали, что стример не формируется в нитевидных структурах с радиусом, меньшим 5 мкм. Формирование плазмы в нитевидном канале частично определяется длиной Дебая (1–2 мкм в этих случаях). Плазма сравнительно легко распространяется в каналах с шириной, превышающей несколько длин Дебая. Для узких каналов, сравнимых с длиной Дебая, происходит перекрытие (с обеих сторон) приграничных плазменных слоев (*sheath regions*), которые по определению равны нескольким длинам Дебая. При сужении канала происходит уменьшение скорости (торможение) стримера вплоть до его полной остановки. В достаточно широком (>5 мкм) канале, ориентированном под углом к внешнему полю, распространение стримера зависит от величины этого угла. Так, наблюдалось распространение стримера при углах менее 30°. При больших углах, в частности в вертикальных каналах (90°), перпендикулярных к направлению внешнего поля, стримеры не формировались.

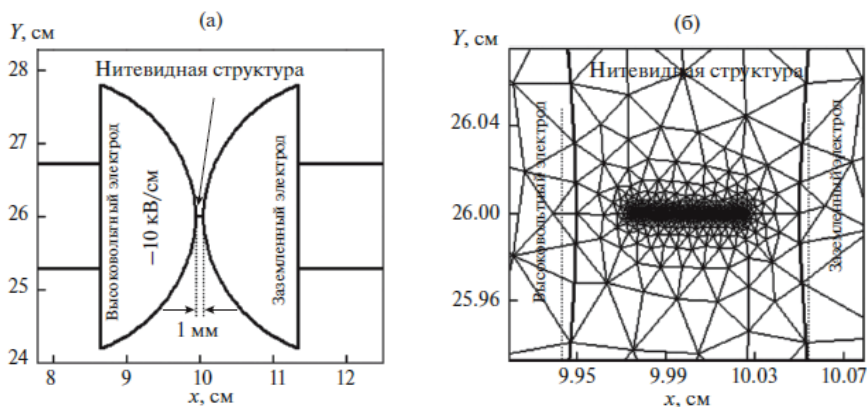


Рис. 1.16. Часть расчетной области для моделирования распространения разряда по нитевидной структуре (а), центральная часть между электродами с вытянутой нитевидной структурой, помещенной в однородном поле 100 кВ/см (б)

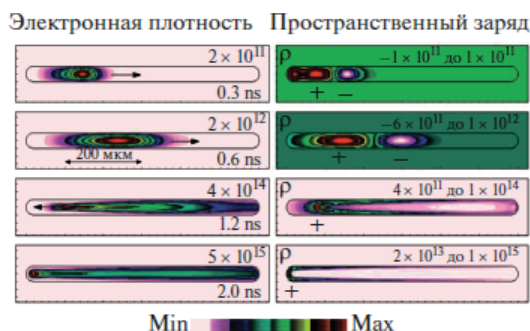


Рис. 1.17. Эволюция электронной плотности (см^{-3}) и пространственного заряда (см^{-3}) в нитевидных каналах; радиус канала – 20 мкм, длина – 500 мкм; стрелки – направление движения стримера; положения положительного и отрицательного пространственных зарядов показано знаками «+» и «-» соответственно; максимальные значения для электронной концентрации и диапазон пространственного заряда в каждый момент времени указаны на рисунке; жидкость – трансформаторное масло

Заключение

Проведенный анализ дает физическую картину процессов, протекающих в жидкости с находящимися в ней газовыми пузырьками. Проанализированы такие аспекты рассматриваемой системы и связанных с ней процессов, которые относятся к электрическому пробое. Хотя основное внимание уделено фундаментальным проблемам, относящимся к газожидкостным системам, этот анализ нацелен на понимание процессов, протекающих при электрическом пробое в жидких диэлектриках, используемых в высоковольтном оборудовании, в частности, пробой трансформаторного масла. Первая стадия этого процесса, происходящая при его старении, связана с образованием газовых пузырьков в жидком диэлектрике под действием электрического поля, т.е. в результате совокупности химических процессов, в том числе

окислительных, которые приводят к образованию газовых молекул. Эти молекулы объединяются в газовые пузырьки, что, с одной стороны, изменяет свойства жидкого диэлектрика, а с другой, облегчает электрический пробой в нем.

Данные процессы протекают медленно и определяют время жизни высоковольтной системы. Химические процессы в жидкости требуют детальных исследований, которые позволят разработать простые подходы с целью увеличения время жизни высоковольтной системы. Например, добавление в диэлектрик слабого электролита позволяет ослабить действие амфифильных молекул, что ослабляет мембрану-пленку, окружающую пузырек, и тем самым облегчает объединение малых пузырьков в пузырьки больших размеров, которые легче всплывают и могут быть удалены из жидкости. Это же и предохраняет диэлектрик от пробоя. Конечно, технология использования жидких диэлектриков в высоковольтных системах в таком случае изменяется, однако такая практика и составляет развитие высоковольтной техники.

Представлены результаты двумерных численных расчетов эволюции стримеров в пузырьках, погруженных в жидкость. Показано, что лавинно-стримерный переход в пузырьке определяется величиной приложенного внешнего поля, параметром pd (давление на размер пузырька), а также количеством и положением исходных свободных зарядов внутри пузырька. Стримеры не образуются в достаточно малых пузырьках при условии, что имеющиеся свободные или инжектированные заряды достаточно малы. Для жидкостей с различной диэлектрической проницаемостью получены соотношения между приложенным полем и количеством заряда в пузырьке, при котором наблюдается формирование стримера. Также исследовались свойства положительных стримеров, распространяющихся по цепочкам и кластерам из пузырьков, наполненных влажным воздухом и погруженных в жидкость. Рассматривались два вида кластеров: кластеры из семи пузырьков с преобладанием горизонтальной ветви, перпендикулярной к направлению электрического поля, и упорядоченная структура из пятнадцати пузырьков. Показано, что из-за взаимной поляризации пузырьков процесс перескакивания стримеров из пузырька в пузырек происходит по-разному в цепочках с преобладанием горизонтальной ветви и в кластерах с упорядоченной структурой. Поляризация горизонтальной ветви пузырьков (ориентированных экватор к экватору по отношению к друг другу) приводит к повышению электрического поля внутри пузырьков по сравнению с полем в изолированном пузырьке, что способствует ветвлению стримеров в жидкости. Также показано, что образование нитевидных структур определенных размеров и определенной ориентации по отношению к вектору внешнего поля может либо облегчать электрический пробой дисперсной системы, либо, наоборот, препятствовать этому. Найден предельный минимальный размер структуры (5 мкм) и максимальный угол ориентации нити по отношению к направлению поля (30°), при которых стример не распространяется.

Литература

1. Kukizaki M., Goto M. Size Control of Nanobubbles Generated from Shirasu-Porous-Glass (SPG) Membranes // J. Membrane Sci. 2006. V. 281. P. 386.

2. *Jahne B., Haussecker H.* Air-Water Gas Exchange // *Ann. Rev. Fluid Mech.* 1998. V. 30. P. 443.
3. *Fluid Mechanics of Environmental Interface / Eds. Gualtieri C., Mikhailovic D.T.* London: Taylor and Francis, 2008. P. 348.
4. *Kim J.-Y., Song M.-G., Kim J.-D.* Zeta Potential of Nanobubbles Generated by Ultrasonication in Aqueous Alkyl Polyglycoside Solutions // *J. Colloids Interf. Sci.* 2000. V. 223. P. 285.
5. *Oeffinger B.E., Wheatley M.A.* Development and Characterization of a Nano-Scale Contrast Agent // *Ultrasonics.* 2004. V. 42. P. 343.
6. *Cho S.-H., Kim J.-Y., Chun J.-H., Kim J.-D.* Ultrasonic Formation of Nanobubbles and Their Zeta-Potentials in Aqueous Electrolyte and Surfactant Solutions // *Colloid and Surfaces.* 2005. V. 269. № A. P. 28.
7. *Ceccato P.H., Guaitella O., Le Gloahec M.R., Rousseau A.* Time-Resolved Nanosecond Imaging of the Propagation of a Corona-Like Plasma Discharge in Water at Positive Applied Voltage Polarity // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2010. V. 43. P. 175202.
8. *An W., Baumung K., Bluhm H.* Underwater Streamer Propagation Analyzed from Detailed Measurements of Pressure Release // *J. Appl. Phys.* 2007. V. 101. P. 053302.
9. *Dumitrescu L., Lesaint O., Bonifaci N., Denat A., Notinger P.* Study of Streamer Inception under Cyclohexane with a Sensitive Charge Measurement Technique under Impulse Voltage // *J. Electrostatics.* 2001. V. 53. P. 135.
10. *Коробейников С.М., Мелехов А.В., Посух В.Г.* // Докл. РАН. 2010. Т. 433. № 6. С. 753.
11. *Korobeynikov S.M., Melekhov A.V., Posukh V.G., Ponomarenko A.G., Boyarintsev E.L., Antonov V.M.* Optical Study of Prebreakdown Cathode Processes in Deionized Water // *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 2009. V. 6. P. 504.
12. *Коробейников С.М., Мелехов А.В.* Оценки напряженности поля безэлектродных стримеров в воде // *TBT.* 2014. Т. 52. № 1. С. 139.
13. *Korobeynikov S.M., Melekhov A.V.* Nonelectrode Streamers in Deionized Water // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2011. V. 39. P. 2632.
14. *Torshin Yu.V.* Prediction of Breakdown Voltage of Transformer Oil from Predischarge Phenomena // *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* V. 10. P. 933.
15. *Barmann P., Kroll S., Sunesson A.* Spatially and Temporally Resolved Electron Density Measurements in Streamers in Dielectric Liquids // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 1997. V. 30. P. 856.
16. *Frayssines P.-E., Bonifaci N., Denat A., Lesaint O.* Streamers in Liquid Nitrogen: Characterization and Spectroscopic Determination of Gaseous Filament Temperature and Electron Density // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2002. V. 35. P. 369.
17. *Foster J.E., Adamovsky G., Gucker S.N., Blankson I.M.A.* Comparative Study of the Time Resolved Decomposition of Methylene Blue Dye Under the Action of a Nanosecond Repetitively Pulsed DBD Plasma Jet Using Liquid Chromatography and Spectrophotometry // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2013. V. 41. P. 503.

18. Sun B., Sato M., Clements J.S. Optical Study of Active Species Produced by a Pulsed Streamer Corona Discharge in Water // J. Electrostat. 1997. V. 39. P. 189.
19. Hayashi H., Hoeben W.F.L.M., Doms G., Veldhuizen E.M., Rutgers W.R., Kroesen G.M.W. LIF Diagnostic for Pulsed-Corona-Induced Degradation of Phenol in Aqueous Solution // J. Phys. D: Appl. Phys. 2000. V. 33. P. 1484.
20. Kittel Ch. Thermal Physics. NY: Wiley, 1970. P. 229.
21. <http://www.engineeringtoolbox.com/air-solubility-water-d-639.html>.
22. Компанеев А.С. Теоретическая физика. Москва: ГИТТЛ, 1957. 370 с.
23. Saha M.N. On a Physical Theory of Stellar Spectra // Proc.Roy.Soc.A. 1921. V. 99. P. 135.
24. Landau L.D., Lifshitz E.M. Statistical Physics. Oxford: Pergamon Press, 1986. P. 277.
25. Handbook of Chemistry and Physics. 86th ed. / Ed. Lide D.R. London: CRC Press, 2003–2004. P. 80.
26. Laplace P.S. Mécanique céleste. Suppl. to the 10th Book Paris: Impr. Impériale, 1805. P. 93.
27. Landau L.D., Lifshitz E.M. Fluid Dynamics. Oxford: Pergamon Press, 1986. P. 539.
28. Левин Г. Физико-химическая гидродинамика. Москва: Физматгиз, 1959. 700 с.
29. Smolukowski M.V. Versuch einer mathematischen Theorie der koagulationskinetischen Lösungen // Zs. Phys. Chem. 1918. Bd 92. S. 129.
30. Smoluchowski M.V. Drei Vorträge über Diffusion, Brownsche Bewegung und Koagulation von Kollid- teilchen // Zs. Phys. 1916. Bd. 17. S. 585.
31. Smirnov B.M. Clusters and Small Particles in Gases and Plasmas. N.Y.: Springer, 1999.
32. Smirnov B.M. Cluster Processes in Gases and Plasmas. Berlin: Wiley, 2010.
33. Smirnov B.M., Berry R.S. Modeling of Configurational Transitions in Atomic Systems // Centr. Chem. J. 2015. V. 9. P. 48.
34. Lushnikov A.A., Negin A.E., Pakhomov A.V. Experimental Observation of the Aerosol-Aerogel Transition // Chemical Physics Letters. 1990. V. 175. № 1–2. P. 138.
35. Lifshits E.M., Pitaevskii L.P. Physical Kinetics. Oxford: Pergamon Press, 1981.
36. Langmuir I. The Constitution and Fundamental Properties of Solids and Liquids // J. Am. Chem. Soc. 1917. V. 39. P. 1848.
37. Langmuir I. Experiments on Oil on Water // J. Am. Educ. 1931. V. 8. P. 850.
38. Blodgett K.B. Films Built by Depositing Successive Monomolecular Layers on a Solid Surface // J. Am. Chem. Soc. 1935. V. 57. P. 1007.
39. <https://en.wikipedia.org/wiki/Amphiphile>.
40. Roberts G. Langmuir-Blodgett Films. N.Y.: Plenum Press, 1990. P. 425.
41. Ulman A. An Introduction to Ultrathin Organic Films: From Langmuir-Blodgett Films of Self assemblies. N.Y.: Academic Press, 1991. P. 442.
42. Reactions and Synthesis in Surfactant Systems / Ed. Texter J. N.Y.: Marcell Dekker, 2001. P. 323.
43. Self-Organized Nanostructures of Amphiphilic Block Copolymers / Eds. Muller A.H.E., Borisov O. Heidelberg: Springer, 2011. P. 29.

44. *Landau L.D., Lifshitz E.M.* Electrodynamics of Continuous Media. Oxford: Pergamon Press, 1984.
45. *Лунинтейн Р.А., Шахнович М.И.* Трансформаторное масло. Москва: Энергоатомиздат, 1983. 296 с.
46. *Jones H.M., Kunhardt E.E.* Pulsed Dielectric Breakdown of Pressurized Water and Salt Solutions // *J. Appl. Phys.* 1995. V. 77. P. 795.
47. *Jones H.M., Kunhardt E.E.* The Influence of Pressure and Conductivity on the Pulsed Breakdown of Water // *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 1994. V. 1. P. 1016.
48. *Коробейников С.М., Мелехов А.В., Бесов А.С.* Зажигание разряда в воде с помощью пузырьков // *ТВТ.* 2002. Т. 40. № 5. С. 706.
49. *Joshi R.P., Schamiloglu E., Gaudet J., Woodworth J.R., Lehr J.* Analysis of Polarity Effects in the Electrical Breakdown of Liquids // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2006. V. 39. P. 359.
50. *Сканави Г.И.* Физика диэлектриков. Область сильных полей. Москва: Гос. изд-во физ-матлит., 1958. 908 с.
51. *Ушаков В.Я.* Импульсный электрический пробой жидкостей. Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та, 1975. 256 с.
52. *Felici N.J.* Blazing a Fiery Trail with the Hounds (Prebreakdown Streamers) // *IEEE Trans. Electr. Insul.* 1988. V. 23. P. 497.
53. *Lewis T.J.* A New Model for the Primary Process of Electrical Breakdown in Liquids // *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 1998. V. 5. P. 306.
54. *Kolb J.F., Joshi R.P., Xiao S., Schoenbach K.H.* Streamers in Water and other Dielectric Liquids // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2008. V. 41. P. 234007.
55. *Lewis T.J.* Breakdown Initiating Mechanisms at Electrode Interfaces in Liquids // *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 2003. V. 10. P. 948.
56. *Bruggeman P., Leys C.* Non-Thermal Plasmas in and in Contact with Liquids // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2009. V. 42. P. 053001.
57. *Bonifaci A., Denat A., Atrazhev V.* Ionization Phenomenon in High-Density Gaseous and Liquid Argon in Corona Discharge Experiments // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 1997. V. 30. P. 2717.
58. *Haidara M., Denat A.* Electron Multiplication in Liquid Cyclohexane and Propane an Estimation of the Ionization Coefficient // *IEEE Trans. Electr. Insul.* 1991. V. 26. P. 592.
59. *Denat A.* High Field Conduction and Prebreakdown Phenomena in Dielectric Liquids // *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 2006. V. 13. P. 518.
60. *Lehr J.M., Agee F.J., Copeland R., Prather W.D.* Measurement of the Electric Breakdown Strength of Transformer Oil in the Sub-Nanosecond Regime // *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 1998. V. 5. P. 857.
61. *Бабаева Н.Ю., Найдис Г.В.* Моделирование положительных стримеров в жидком аргоне // *Письма в ЖТФ.* 1999. Т. 25. № 3. С. 19.
62. *Naidis G.V.* Modelling of Streamer Propagation in Hydrocarbon Liquids in Point-Plane Gaps // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2015. V. 48. P. 195203.
63. *Starikovskiy A., Yang Y., Cho Y., Fridman A.* NonEquilibrium Plasma in Liquid Water: Dynamics of Generation and Quenching // *Plasma Sources Sci. Technol.* 2011. V. 20. P. 024003.

64. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2009. 736 с.
65. Lesaint O. Prebreakdown phenomena in liquids: propagation «modes» and basic physical properties // J. Phys. D: Appl. Phys. 2016. V. 49. P. 144001.
66. Tobazeon R. Prebreakdown Phenomena in Dielectric Liquids // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. 1994. V. 1. P. 1132.
67. Stalder K.P., Woloszko J., Brown I.J., Smith C.D. Repetitive Plasma Discharges in Saline Solutions // Appl. Phys. Lett. 2001. V. 79. P. 4503.
68. Stalder K.P., McMillen D.F., Woloszko J. Electrosurgical Plasmas // J. Phys. D: Appl. Phys. 2005. V. 38. P. 1728.
69. Stalder K.R., Nersisyan G., Graham W.G. Spatial and Temporal Variation of Repetitive Plasma Discharges in Saline Solutions // J. Phys. D: Appl. Phys. 2006. V. 39. P. 3457.
70. Schaper L., Graham W.G., Stalder K.P. Vapour Layer Formation by Electrical Discharges Through Electrically Conducting Liquids-Modelling and Experiment // Plasma Sources Sci. Technol. 2011. V. 20. P. 034003.
71. Lesaint O., Gournay P. On the Gaseous Nature of Positive Filamentary Streamers in Hydrocarbon Liquids. I: Influence of the Hydrostatic Pressure on the Propagation // J. Phys. D: Appl. Phys. 1994. V. 27. P. 2111.
72. Gournay P., Lesaint O. On the Gaseous Nature of Positive Filamentary Streamers in Hydrocarbon Liquids. II: Propagation, Growth and Collapse of Gaseous Filaments in Pentane // J. Phys. D: Appl. Phys. 1994. V. 27. P. 2117.
73. FitzPatrick G.J., McKenny P.J., Forster E.O. The Effect of Pressure on Streamer Inception and Propagation in Liquid Hydrocarbons // IEEE Trans. Electr. Ins. 1990. V. 25. P. 672.
74. Kolb J.F., Joshi R.P., Xiao S., Schoenbach K.H. Streamers in Water and other Dielectric Liquids // J. Phys. D: Appl. Phys. 2008. V. 41. P. 234007.
75. Joshi R.P., Kolb J.F., Xiao S., Schoenbach K.H. Aspects of Plasma in Water: Streamer Physics and Applications // Plasma Process Polym. 2009. V. 6. P. 763.
76. Клишкин В.Ф. Особенности развития электрического пробоя воды в субмиллиметровых промежутках // ЖТФ. 1987. Т. 57. С. 805.
77. Клишкин В.Ф. Границы механизмов электрического пробоя н-гексана в квазиоднородном поле // ЖТФ. 1991. Т. 61. С. 80.
78. Marinov I., Guaitella O., Rousseau A., Starikovskaia S.M. Cavitation in the Vicinity of the Highvoltage Electrode as a Key Step of Nanosecond Breakdown in Liquids // Plasma Sources Sci. Technol. 2013. V. 22. P. 42001.
79. Коробейников С.М., Янишин Э.В. Динамика электрострикционного давления у сферического электрода // ЖТФ. 1983. Т. 53. С. 5.
80. Starikovskiy A. Pulsed Nanosecond Discharge Development in Liquids with Various Dielectric Permittivity Constants // Plasma Sources Sci. Technol. 2013. V. 22. P. 012001.
81. Shneider M.N., Pekker M., Fridman A. Theoretical Study of the Initial Stage of Sub-Nanosecond Pulsed Breakdown in Liquid Dielectrics // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. 2012. V. 19. P. 1597.
82. Shneider M.N., Pekker M. Dielectric Fluid in Inhomogeneous Pulsed Electric Field // Phys. Rev. E 2013. V. 87. P. 043004.

83. *Seepersad Y., Pekker M., Shneider M.N., Fridman A., Dobrynin D.* On the Electrostrictive Mechanism of Nanosecond-Pulsed Breakdown in Liquid Phase // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2013. V. 46. P. 162001.

84. *Dobrynin D., Seepersad Y., Pekker M., Shneider M.N., Friedman G., Fridman A.* A Non-Equilibrium Nanosecond-Pulsed Plasma Generation in Liquid Phase (Water, PDMS) Without Bubbles: Fast Imaging, Spectroscopy and Leader-Type Model // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2013. V. 46. P. 105201.

85. *Seepersad Y., Pekker M., Shneider M.N., Fridman A., Dobrynin D.* Investigation of Positive and Negative Modes of Nanosecond Pulsed Discharge in Water and Electrostriction Model of Initiation // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2013. V. 46. P. 3555201.

86. *Pekker M., Seepersad Y., Shneider M.N., Fridman A., Dobrynin D.* Initiation Stage of Nanosecond Breakdown in Liquid // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2014. V. 47. P. 025502.

87. *Торшин Н.В.* К проблеме существования лидерного процесса при импульсном электрическом пробое трансформаторных масел // *Электричество*. 1993. Т. 5. С. 4.

88. *Lisitsyn I.V., Nomiyama H., Katsuki S., Akiyama H.* Thermal Processes in a Streamer Discharge in Water // *IEEE Trans. Dielect. Electr. Insulation*. 1999. V. 6. P. 351.

89. *Ушаков В.Я., Клишкин В.Ф., Коробейников С.М., Лопатин В.В.* Пробой жидкостей при импульсном напряжении / Под ред. Ушакова В.Я. Томск: Изд-во науч.-техн. лит., 2005.

90. *Samukawa S., Hori M., Rauf S., Tachibana K., Bruggeman P., Kroesen G., Whitehead J., Murphy A.B., Gutsol A.F., Starikovskaia S., Kortshagen U., Boeuf J.P., Sommerer T.J., Kushner M.J., Czarnetzki U., Mason N.* The 2012 Plasma Road Map // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2012. V. 45. P. 253001.

91. *Foster J.E., Sommers B.S., Gucker S.N., Blankson I.M., Adamovsky G.* Perspectives on the Interaction of Plasmas with Liquid Water for Water Purification // *IEEE Trans Plasma Sci.* 2012. V. 40. P. 1311.

92. *Locke B.R., Sunka P., Sato M., Hofmann M., Chang J.S.* Electrohydraulic Discharge and Non-Thermal Plasma for Water Treatment // *Ind. Eng. Chem. Res.* 2006. V. 45. P. 882.

93. *Sunka P.* Pulse Electrical Discharges in Water and Their Applications // *Phys. Plasmas*. 2001. V. 8. P. 2587.

94. *Malik M.A., Ghaffar A., Malik S.A.* Water Purification by Electrical Discharges // *Plasma Sources Sci. Technol.* 2001. V. 10. P. 82.

95. *Akiyama H.* Streamer Discharges in Liquids and Their Applications // *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 2000. V. 7. P. 646.

96. *Hoeben W.F.L.M., van Veldhuizen E.M., Rutgers W.R., Cramers C.A.M.G., Kroesen G.M.W.* The Degradation of Aqueous Phenol Solutions by Pulsed Positive Corona Discharges // *Plasma Sources Sci. Technol.* 2000. V. 9. P. 361.

97. *Lukes P., Locke B.R.* Degradation of Substituted Phenols in a Hybrid Gas-Liquid Electrical Discharge Reactor // *Ind. Eng. Chem. Res.* 2005, V. 44. P. 2921.

98. *Sun B., Sato M., Clements J.S.* Use of a Pulsed High Voltage Discharge for Removal of Organic Compounds in Aqueous Solution // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 1999. V. 32. P. 1908.

99. *Sugiarto A.T., Ito S., Ohshima T., Sato M., Skalny J.D.* Oxidative Decoloration of Dyes by Pulsed Discharge Plasma in Water // *J. Electrostatics*. 2003. V. 58. P. 135.

100. *Locke B.R., Shih K.Y.* Review of the Methods to Form Hydrogen Peroxide in Electrical Discharge Plasma with Liquid Water // *Plasma Sources Sci. Technol.* 2011. V. 20. P. 034006.

101. *Sunka P., Babicky V., Clupek M., Lukes P., Simek M., Schmidt J., Cernak M.* Generation of Chemically Active Species by Electrical Discharges in Water // *Plasma Sources Sci. Technol.* 1999. V. 8. P. 258.

102. *Lukes P., Locke B.R.* Plasmachemical Oxidation Processes in a Hybrid Gasyliquid Electrical Discharge Reactor // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2005. V. 38. P. 4074.

103. *Kirkpatrick M.J., Locke B.R.* Hydrogen Oxygen, and Hydrogen Peroxide Formation in Aqueous Phase Pulsed Corona Electrical Discharge // *Ind. Eng. Chem. Res.* 2005. V. 44. P. 4243.

104. *Fridman G., Friedman G., Gutsol A., Shekhter A.B., Vasilets V.N., Fridman A.* Applied Plasma Medicine // *Plasma Process. Polym.* 2008. V. 5. P. 503.

105. *Sato M.* Environmental and Biotechnological Applications of High-Voltage Pulsed Discharges in Water // *Plasma Sources Sci. Technol.* 2008. V. 17. P. 024021.

106. *Efremov E.M., Adamiak B.Y., Blochin V.I., Dadashev S.J., Dmitriev K.I., Semjonov V.N., Levashov V.F., Jusbashev V.F.* Experimental Investigation of the Action of Pulsed Electrical Discharges in Liquids on Biological Objects // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2000. V. 28. P. 224.

107. *Graham W.G., Stalder K.R.* Plasmas in Liquids and Some of their Applications in Nanoscience // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2011. V. 44. P. 174037.

108. *Brablec A., Slavicek P., Stahel P., Cizmar T., Trunec D., Simor M., Cernak M.* Underwater Pulse Electrical Diaphragm Discharges for Surface Treatment of Fibrous Polymeric Materials // *Czech. J. Phys.* 2002. V. 52 (Suppl. D). P. 491.

109. *Imasaka K., Kato Y., Suehiro J.* Enhancement of Microplasma-Based Water-Solubilization of Singlewalled Carbon Nanotubes Using Gas Bubbling in Water // *Nanotechnology*. 2007. V. 18. P. 335602.

110. *Anpilov A.M., Barkhudarov E.M., Christofi N., Kopyev V.A., Kossyi I.A., Taktakishvili M.I., Zadiraka Y.* Pulsed High Voltage Electric Discharge Disinfection of Microbially Contaminated Lliquids // *Lett. Appl. Microbiology*. 2002. V. 35. P. 90.

111. *Locke B.R., Sunka P., Sato M., Hoffmann M., Chang J.S.* Electrohydraulic Discharge and Non-Thermal Plasma for Water Treatment // *Ind. Eng. Chem. Res.* 2006. V. 45. P. 882.

112. *Sugiarto A.T., Sato M., Oshima T., Skalny J.D.* Characteristics of Ring-to-Cylinder Type Electrode System on Pulsed Discharge in Water // *J. Adv. Oxid. Technol.* 2002. V. 5. P. 211.

113. *Сон Э.Е., Суворов И.Ф., Какауров С.В., Гайсин Ал.Ф., Самитова Г.Т., Соловьева Т.Л., Юдин А.С., Рахлецова Т.В.* Электрические разряды с жидкими электродами и их применение для обеззараживания вод // *ТВТ*. 2014. Т. 52. № 4. С. 512.

114. Шакирова Э.Ф., Гайсин Ал.Ф., Сон Э.Е. Многоканальный разряд между струйным электролитическим катодом и струйным электролитическим анодом // ТВТ. 2011. Т. 49. С. 3.
115. Velikonja J., Bergougnou M.A., Castle G.S.P., Cairns W.L., Incelet I.I. Co-Generation of Ozone and Hydrogen Peroxide by Dielectric Barrier AC Discharge in Humid Oxygen // Ozone Sci. Eng. 2001. V. 23. P. 467.
116. Panov V.A., Kulikov Yu.M., Son E.E., Tyuftayev A.S., Gadzhiev M.Kh., Akimov P.L. Electrical breakdown voltage of transformer oil with gas bubbles // High Temp. 2014. V. 52. № 5. P. 770.
117. Ishijima T., Sugiura H., Saito R., Toyoda H., Sugai H. Efficient Production of Microwave Bubble Plasma in Water for Plasma Processing in Liquid // Plasma Sources Sci. Technol. 2010. V. 19. P. 015010.
118. Joshi A.A., Locke B.R., Arce P., Finney W.C. Formation of Hydroxyl Radicals, Hydrogen Peroxide and Aqueous Electrons by Pulsed Streamer Corona Discharge in Aqueous Solution // J. Hazard. Mater. 1995. V. 41. P. 3.
119. Бобкова Е.С., Ходор Я.В., Корнилова О.Н., Рыбкин В.В. Химический состав плазмы диэлектрического барьерного разряда атмосферного давления с жидким электродом // ТВТ. 2014. Т. 52.4. С. 535.
120. Бобкова Е.С., Рыбкин В.В. Оценка параметров электронов в диэлектрическом барьерном разряде атмосферного давления с жидким электродом // ТВТ. 2013. Т. 52. № 6. С. 825.
121. Sunka P. Pulse Electrical Discharges in Water and Their Applications // Phys. Plasmas 2001. V. 8. P. 2587.
122. Gershman S., Mozgina O., Belkind A., Becker K., Kunhardt E. Pulsed Electrical Discharge in Bubbled Water // Contrib. Plasma Phys. 2007. V. 47. P. 19.
123. Sato M., Ohgiyama T., Clements J.S. Formation of Chemical Species and their Effects on Microorganisms Using a Pulsed High-Voltage Discharge in Water // IEEE Trans. Indust. Appl. 1996. V. 32. P. 106.
124. Bruggeman P., Degroote J., Vierendeels J., Leys C. Dc-Excited Discharges in Vapour Bubbles in Capillaries // Plasma Sources Sci. Technol. 2008. V. 17. P. 025008.
125. Garcia M.C., Gucker S.N., Foster J.E. Understanding the Plasma and Power Characteristics of a Self-Generated Steam Bubble Discharge // J. Phys. D: Appl. Phys. 2015. V. 48. P. 355203.
126. Bruggeman P., Leys C. Non-Thermal Plasmas in and in Contact with Liquids // J. Phys. D: Appl. Phys. 2009. V. 42. P. 053001.
127. Vanraes P., Nikiforov A., Leys C. Electrical and Spectroscopic Characterization of Underwater Plasma Discharge Inside Rising Gas Bubbles // J. Phys. D: Appl. Phys. 2012. V. 45. P. 245206.
128. Kurahashi M., Katsura S., Mizuno A. Radical Formation Due to Discharge Inside a Bubble in Liquid // J. Electrostatics. 1997. V. 42. P. 93.
129. Miichi T., Hayashi N., Ihara S., Satoh S., Yamabe C. Generation of Radicals Using Discharge Inside Bubbles in Water for Water Treatment // Ozone Sci. Eng. 2002. V. 24. P. 471.
130. Sato K., Yasuoka K., Ishii S. Water Treatment with Pulsed Discharges Generated Inside Bubbles // Electr. Eng. Jpn. 2010. V. 170. P. 1.

131. *Stratton J.A.* Electromagnetic Theory. New York: McGraw-Hill, 1941. 569 p.
132. *Aoki H., Kitano K., Hamaguchi S.* Plasma Generation Inside Externally Supplied Ar Bubbles in Water // *Plasma Sources Sci. Technol.* 2008. V. 17. P. 025006.
133. *Tian W., Tachibana K., Kushner M.J.* Plasmas Sustained in Bubbles in Water: Optical Emission and Excitation Mechanisms // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2014. V. 47. P. 055202.
134. *Sato K., Yasuoka K.* Pulsed Discharge Development in Oxygen, Argon, and Helium bubbles in water // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2008. V. 36. P. 1144.
135. *Takeuchi N., Ishii Y., Yasuoka K.* Modelling Chemical Reactions in dc Plasma Inside Oxygen Bubbles in Water // *Plasma Sources Sci. Technol.* 2012. V. 21. P. 015006.
136. *Gershman S., Mozgina O., Belkind A., Becker K., Kunhardt E.* Pulsed Electrical Discharge in Bubbled Water // *Contrib. Plasma Phys.* 2007. V. 47. P. 19.
137. *Foster J.E., Weatherford B.R., Gillman E., Yee B.* Underwater Operation of a DBD Plasma Jet // *Plasma Sources Sci. Technol.* 2010. V. 19. P. 25001.
138. *Tachibana K., Takekata Y., Mizumoto Y., Motomura H., Jinno M.* Analysis of a Pulsed Discharge Within Single Bubbles in Water Under Synchronized Conditions // *Plasma Sources Sci. Technol.* 2011. V. 20. P. 034005.
139. *Sommers B.S., Foster J.E., Babaeva N.Yu., Kushner M.J.* Observations of Electric Discharge Streamer Propagation and Capillary Oscillations on the Surface of Air Bubbles in Water // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2011. V. 44. P. 082001.
140. *Gucker S.N., Sommers B.S., Foster J.E.* Plasma Production in Isolated Bubbles // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2014. V. 42. P. 2636.
141. *Foster J.E., Sommers B., Gucker S.* Towards Understanding Plasma Formation in Liquid Water Via Single Bubble Studies // *Jap. J. Appl. Phys.* 2015. V. 54. P. 01AF05.
142. *Sommers B.S., Foster J.E.* Plasma Formation in Underwater Gas Bubbles // *Plasma Sources Sci. Technol.* 2014. V. 23. P. 015020.
143. *Коробейников С.М., Мелехов А.В., Посух В.Г.* Экспериментальные исследования поведения пузырьков в воде // *ТВТ.* 2001. Т. 39. № 2. С. 163.
144. *Коробейников С.М.* О роли пузырьков в электрическом пробое жидкостей. Предпробойные процессы // *ТВТ.* 1998. Т. 36. № 4. С. 362.
145. *Коробейников С.М.* О роли пузырьков в электрической прочности жидкостей. Сопоставление с экспериментом // *ТВТ.* 1998. Т. 36. № 4. С. 541.
146. *Коробейников С.М., Мелехов А.В., Посух В.Г., Антонов В.М., Рояк М.Э.* Экспериментальное исследование поведения пузырьков под действием сильных электрических полей // *ТВТ* 2001. Т. 39. № 2. С. 181.
147. *Sommers B.S., Foster J.E.* Nonlinear Oscillations of Gas Bubbles Submerged in Water: Implications for Plasma Breakdown // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2012. V. 45. P. 415203.
148. *Коробейников С.М., Мелехов А.В., Синих Ю.Н., Соловейчик Ю.Г.* Влияние сильных электрических полей на поведение пузырьков в воде // *ТВТ.* 2001. Т. 39. № 3. С. 395.

149. Шмелев В.М., Анпилов А.М., Бархударов Э.М. Поверхностный разряд внутри воздушной каверны в воде // Прикладная физика. 2005. Т. 5. С. 55.
150. Gucker S.N. Plasma Discharges in Gas Bubbles in Liquid Water: Breakdown Mechanisms and Resultant Chemistry. Ph.D. Dissertation. Ann Arbor: University of Michigan, MI. 2015. 247 p.
151. Ahmad Hamdan and Min Suk Cha. Ignition Modes of Nanosecond Discharge with Bubbles in Distilled water // J. Phys. D: Appl. Phys. 2015. V. 48. P. 405206
152. Babaeva N.Y., Bhoj A.N., Kushner M.J. Streamer Dynamics in Gases Containing Dust Particles // Plasma Sources Sci. Technol. 2006. V. 15. P. 591.
153. Babaeva N.Y., Kushner M.J. Effect of Inhomogeneities on Streamer Propagation: II. Streamer Dynamics in High Pressure Humid Air with Bubbles // Plasma Sources Sci. Technol. 2011. V. 18. P. 035010.
154. Babaeva N.Yu., Tereshonok D.V., Naidis G.V. Initiation of Breakdown in Bubbles Immersed in Liquids: PreExisted Charges vs. Bubble Size // J. Phys. D: Appl. Phys. 2015. V. 48. P. 355201.
155. Babaeva N.Yu., Tereshonok D.V., Naidis G.V., Smirnov B.M. Initiation of Breakdown in String of Bubbles Immersed in Transformer Oil: String Orientation and Proximity of Bubbles // J. Phys. D. Appl. Phys. 2016. V. 49. P. 025202.
156. Meek J.M. Theory of Spark Discharge // Phys. Rev. 1940. V. 57. P. 722.
157. Loeb L.B. Electrical Coronas. Berkeley, CA: University of California Press, 1965.
158. Babaeva Natalia Yu., Kushner Mark J. Structure of Positive Streamers Inside Gaseous Bubbles Immersed in Liquids // J. Phys. D: Appl. Phys. 2009. V. 42. P. 132003.

ГЛАВА 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРОБОЯ В ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ДУХФАЗНЫХ СРЕДАХ

Представлены результаты исследований изоляционных свойств трансформаторного масла газированного гексафторидом серы (элегаза), воздухом, аргонном и гелием с квазиравномерным распределением газовых включений при постоянных напряжениях до 140 кВ. Показано, что газирование трансформаторного масла элегазом приводит к относительному снижению значения напряжения пробоя на 20 % и стабилизации этого значения, в то время как при газировании его воздухом напряжение пробоя уменьшается на 45 %.

2.1. Электрическая прочность газожидкостных смесей трансформаторного масла с элегазом и воздухом

Интерес к электроизоляционным свойствам двухфазных сред связан с наличием у них хороших демпфирующих свойств. Распространение возмущений различной амплитуды в газо-жидкостных средах активно изучается с середины XX века. Основные результаты исследований представлены в работах [1–8].

Несмотря на постоянно совершенствующиеся методы диагностики состояния изоляционных материалов высоковольтного маслонаполненного оборудования число аварий остается велико. Согласно статистике ВНИИ-ПО в среднем за год происходит порядка 400 аварий связанных с взрывами и возгораниями трансформаторного оборудования, и наносящих большой экологический, экономический ущерб. В связи с этим разработка дополнительной демпфирующей системы, применение которой не связано с серьезными изменениями конструкции существующего оборудования, является актуальной задачей. Выбор элегаза в качестве рабочего газа связан с его высокими электроизолирующими свойствами.

Исследованию зависимости пробойного напряжения жидких диэлектриков от параметров жидкости и окружающей среды посвящено значительное количество работ. Влияние химического состава, влажности, температуры хорошо освещено в [2]. Влияние геометрии электродов, вида прикладываемого напряжения, механизмы инициации и развития разряда хорошо исследовано и описано в [3]. Влияние одиночных пузырьков на развитие пробоя в жидкости также интенсивно исследуется [4–6].

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование в лабораторных условиях электрической прочности двухфазных микропузырьковых сред «трансформаторное масло-элегаз» и «трансформаторное масло-воздух» при объемном газосодержании до 10 %.

2.2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Для исследования электроизоляционных свойств двухфазных микропузырьковых сред был разработан и изготовлен экспериментальный стенд [9–11], состоящий из трех частей: электрической, гидродинамической и диагностической. Общая схема представлена на рис. 2.1.

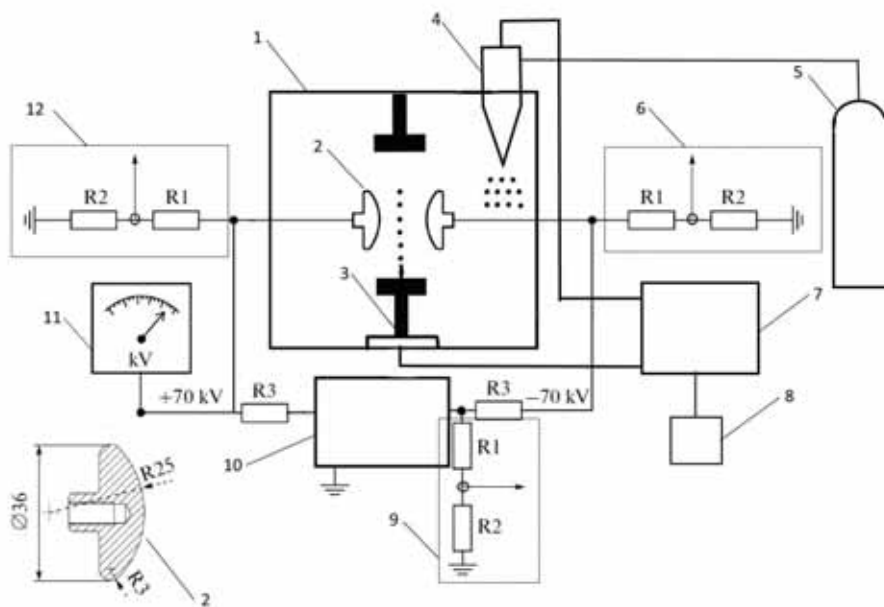


Рис. 2.1. Принципиальная схема экспериментальной установки для исследования электрических характеристик разряда в жидких диэлектриках: 1 – разрядная камера, 2 – электроды, 3 – ультразвуковой излучатель с иглой для создания одиночных пузырьков газа, 4 – генератор микропузырьковых сред, 5 – баллон газовый, 6, 9, 12 – высоковольтные делители напряжения, 7 – насос центробежный, 8 – преобразователь частоты центробежного насоса, 10 – испытательная установка АИИ-70 с диодно-емкостным удвоителем напряжения, 11 – киловольтметр С100.

Электрическая часть состоит экспериментальной установки (рис. 2.2а) из источника питания АИИ-70 с выходным напряжением до 70 кВ и удвоителя напряжения (рис. 2.2б), собранный по стандартной схеме, которые генерируют на разрядном промежутке колебания напряжения пилообразной формы с частотой 100 Гц.

Напряжение на выходе измерялось электростатическим киловольтметром. Для оценки амплитудных значений напряжения и тока использовались три высоковольтных делителя напряжения на резисторах КЭВ-20 [9]. Делители напряжения 6 и 12 регистрируют напряжение на выводах разрядной камеры, что пропорционально (с коэффициентом 6770) разности потенциалов на электродах камеры и итоговая осциллограмма напряжения формируется при подаче сигналов с делителей на двухканальный осциллограф с включенной функцией вычитания сигналов. Между делителями 6 и 9

выделяется сигнал пропорциональный разности потенциалов на токоограничивающем сопротивлении. В этом случае разность потенциалов на сборке пропорциональна току с коэффициентом $1/R_3$. Таким образом, итоговая осциллограмма тока формируется аналогично осциллограмме напряжения: при подаче сигналов с данных делителей на двухканальный осциллограф с включенной функцией вычитания сигналов. Для обеспечения безопасности при работе на высоковольтной установке был доработан земляной контур и создано сеточное защитное ограждение.



Рис. 2.2а. Экспериментальный стенд



Рис. 2.2б. Удвоитель напряжения

Разрядная камера представляет собой открытый в атмосферу цилиндр с внутренним диаметром 200 мм, высотой 550 мм, выполненный из оргстекла. Electroды выполнены из меди и имеют форму шарового сегмента (рис. 2.3) диаметром 36 мм, толщиной 13 мм и радиусом кривизны 25 мм (ГОСТ 6581–75). Межелектродное расстояние может варьироваться в диапазоне (0–20) мм и во всех экспериментах было установлено на уровне 8 мм. Выбор расстояния связан с максимизацией количества микропузырьков между электродами с учетом максимального значения напряжения в 140 кВ. В боковой поверхности на уровне электродов имеется смотровое окно, выполненное из кварцевого стекла марки КУ-1. В верхней части установлен генератор, осуществляющий подачу микропузырьковой среды (рис. 2.4) сверху вниз, обеспечивая, таким образом, равномерное заполнение объема пузырьками при их последующем всплытии. Забор жидкости происходит на высоте 200 мм от дна камеры.

Гидродинамическая часть установки предназначена для создания микропузырьковой газожидкостной среды. В ее состав генератор микропузырьковой среды, насос для подачи жидкости в генератор, сосуд высокого давления с элегазом (или компрессор в случае использования воздуха в качестве рабочего газа) с редуктором для подачи газа в генератор. Принцип действия генератора (рис. 2.4) основан на обжати тонкой аксиальной струи жидкости тангенциальным потоком газа в цилиндрической камере с последующим истечением через сужающуюся часть трубки Вентури [12] с выходным сечением с диаметром 2 мм.



Рис.2.3. Электроды в разрядной камере

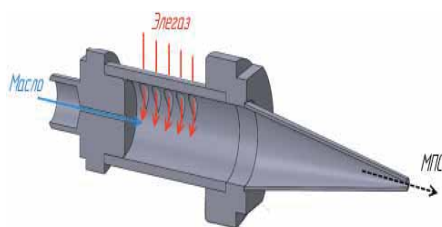


Рис.2.4. Продольное сечение ротационного генератора

Для установления расхода жидкости на требуемом уровне насос дополнительно оборудован преобразователем частоты, регулирующим частоту вращения лопастей насоса и обеспечивающим регулировку расхода в диапазоне (0–50) л/мин. Основным элементом гидродинамической системы является генератор микропузырьковой среды с большой производительностью – до 30 л/мин при объемном газосодержании 10 %. Запуск генератора начинался с подачи масла при давлении (4–5) bar, затем подавался газ. При истечении в сосуд скоростного потока смеси жидкости с газом происходит его расширение и дробление пузырьков, что обеспечивает газирование трансформаторного масла в разрядной камере с объемной долей газа 2–10 % (рис. 2.5). Характерный диаметр полученных пузырьков составил (50–150) мкм (рис. 2.6). Предварительный расчет рабочих параметров генератора был произведен в программе FlowVision в рамках одножидкостной модели с переменной плотностью.



Рис. 2.5. Уровень чистого и газированного трансформаторного масла



Рис. 2.6. Характерный размер пузырьков

Диагностическая часть установки состоит из стрелочного киловольтметра С100, осциллографа Tektronix TDS2014С, подключенного к делителям напряжения через дополнительные пробники напряжения Tektronix P6015, и высокоскоростной CMOS-камеры RedLake MotionPro X3 для визуальной регистрации разрядных процессов (рис. 2.7).

2.3. СПЕКТРАЛЬНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ДВУХФАЗНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКХ РАЗРЯДОВ

Спектральные измерения выполняются с помощью одноканального оптоволоконного спектрометра AvaSpec 3648, с диапазоном 220–1100 нм и спектральным разрешением около 1 нм (рис. 2.8). Первоначально тестовые спектральные измерения разрядного промежутка выполнялись с помощью стеклянного тубуса с кварцевым окном на конце (рис. 2.9), который в последующем был вмонтирован в разрядную камеру.

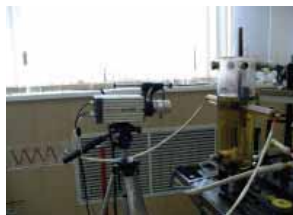


Рис. 2.7. Система видео-регистрации



Рис. 2.8. Направляющая для спектральных измерений



Рис. 2.9. Стеклянный тубус, для спектральных измерений

При изучении процессов, возникающих при пробое двухфазной среды, производится постепенное увеличение напряжения на испытательной установке АИИ-70 до возникновения пробоя. Исследование временной эволюции и динамики развития разряда проводится с помощью высокоскоростной камеры с трехцветной матрицей Motion Pro X3 (США) с 1.3 мегапиксельным (1248×1008 пикселей) цветным CMOS-сенсором фирмы Micron с диагональю 19.7 мм, частотой кадров $1 \div 10$ кГц и минимальной экспозицией 1 мкс. В сочетании с длиннофокусным объективом «Юпитер-21М» с системой удлинительных колец камера обеспечивает регистрацию в масштабе 1:3 изображения в течение всего периода наблюдения, с сохранением в буферной памяти до 3000 кадров. При этом скоростную фотосъемку можно производить с частотой следования кадров до 4000 к/с и экспозицией (1–1000) мкс (рис. 2.10).

При спектральных измерениях наблюдение велось с помощью кварцевых конденсоров: резкое изображение разряда проектировалось на вход высокочувствительного оптоволоконного трехканального спектрометра Avaspec. Спектры записывались на 2 канала спектрометра AvaSpec-ULS3648-USB2-RM в диапазонах 200–400нм и 400–600нм с аппаратной функцией в 1 Å, и на один канал спектрометра Avaspec- ULS2048L-USB2-RM в диапазоне 600–1000нм с аппаратной функцией в 4 Å. Спектры снимались с экспозициями в 100 и 10 мс.



Рис. 2.10. Кадры при скоростной визуализации процесса пробоя трансформаторного масла

Методы анализа данных спектров:

1. Концентрация электронов n_e может быть получена по Штарковской полуширине Бальмеровских линий водорода H_α и H_β или по линиям NI с большими константами штарк-эффекта.

2. Подсчет электронной температуры T_e производится методом относительных интенсивностей линий одного типа (например NI или OI) используя уравнение [1]:

$$\frac{I_{ki}}{I_{mn}} = \frac{A_{ki}g_k\lambda_{mn}}{A_{mn}g_m\lambda_{ki}} \exp\left(-\frac{E_k - E_m}{kT_e}\right)$$

или метод относительных интенсивностей линий частиц разной кратности ионизации (например, однократных (НИ) и двукратных (НИИ) ионов азота) используя уравнение [13]:

$$\frac{I_{ki}}{I_{mn}} = 2 \frac{A_{ki}g_k\lambda_{mn}}{A_{mn}g_m\lambda_{ki}} \left(\frac{2\pi m k T_e}{h^2}\right)^{3/2} \frac{1}{n_e} \exp\left(-\frac{E_k - E_m + E_I^{++}}{kT_e}\right)$$

где A_{ki} – вероятность перехода, g – стат вес, λ – длина волны линии, E – энергия возбуждения отсчитываемая от основного состояния соответствующего атома (иона); все являются табличными значениям полученными из базы данных NIST.

3. Если в спектре присутствуют молекулярные полосы, то используя программное обеспечение Spesair для построения моделей электронно-вращательно-колебательных спектров можно подсчитать вращательную температуру молекул, которая как правило соответствует газовой температуре плазмы.

Тестовый эксперимент был проведен в две стадии. В первом цикле исследований использовался воздух для создания пузырьков между электродами в масле, на втором этапе использовался элeгаз. Примеры спектров показаны на рис. 2.11, из которых следует, что масло поглощает весь спектр излучения вплоть до 400нм, а в диапазоне 450÷600 нм наблюдается квазинепрерывное излучение с $\lambda_{\max} \approx 540$ нм. На рис. 2.11 в отчетливо видна линия H_α с длиной волны 656нм, наложенная на интенсивный псевдо континуум. После вычета континуума по штарковской полуширине линии H_α была определена концентрация электронов, с использованием уравнения [14]. Была получено значение концентрация $n_e = (2.0 \pm 0.3) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. При съемке с меньшей экспозицией было установлено, что концентрация достигает своего максимума и стабилизируется на 50 миллисекунде с начала пробы. Отличия измеренной концентрации электронов при применении элeгаза вместо воздуха замечено не было.

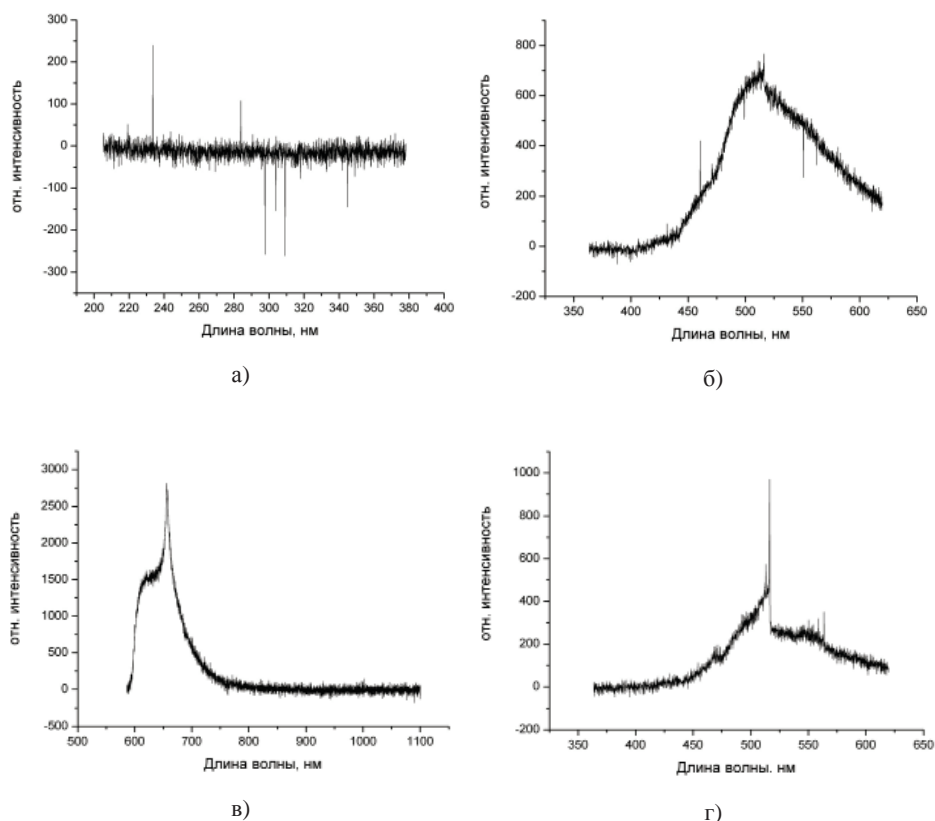


Рис. 2.11. Спектры пробоя трансформаторного масла

На рис. 2.11б заметен скачок на длине волны 516 нм, при дальнейшем проведении экспериментов был получен более точный график участка 400–600 нм представленный на рис. 2.11г. Скачок на 516 нм и группа пиков на 470÷475 нм были идентифицированы как молекулярная полоса C_2 . Используя программное обеспечение Sresair по полосе (0,0) была оценена вращательная температура молекул C_2 , оказавшаяся равной 1500 К.

Важной характеристикой разряда в масле является его вольтамперная характеристика (ВАХ) и диэлектрическая прочность, определяющая напряжение пробоя [6, 15]. Форма сигнала напряжения источника питания с диодно-емкостным удвоителем определялась подачей выпрямленного напряжения между электродами ниже пробивного (рис. 2.12, луч 1, отсчет идет от нуля). Видно, что напряжение имеет пилообразную форму с частотой 100 Гц, где при полной амплитуде сигнала $\sim 38 \div 39$ кВ, на постоянную составляющую приходится ~ 14 кВ, а на амплитуду пилообразных пульсаций $\sim 14 \div 15$ кВ.

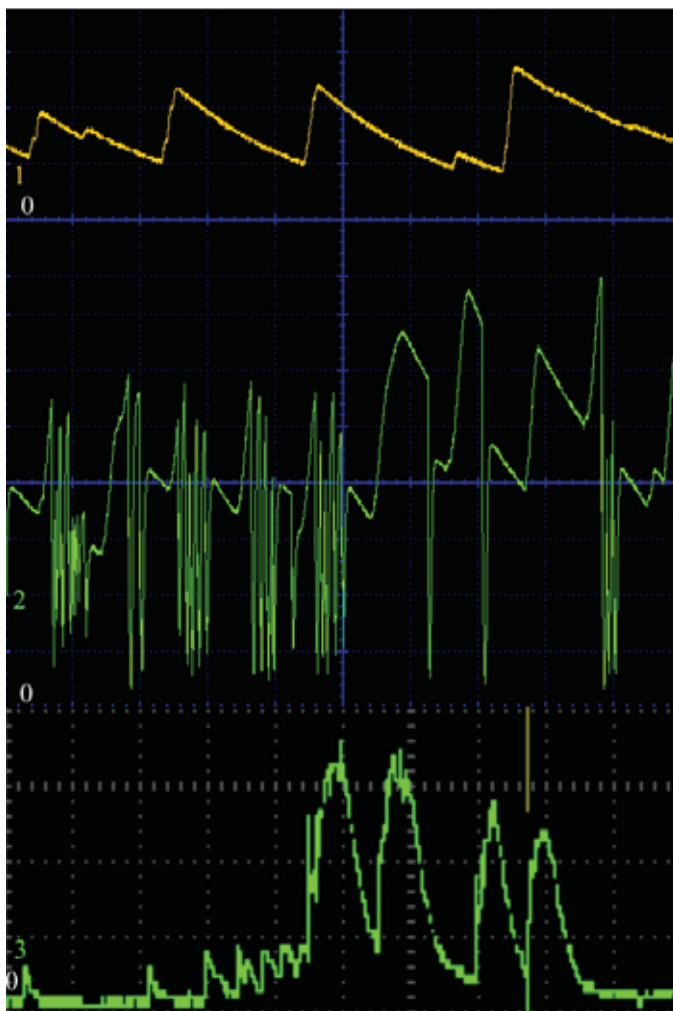


Рис. 2.12. Осциллограмма напряжения и тока:

1 – колебания напряжения на разрядном промежутке при подаче напряжения меньше пробивного (цена деления 13.5 кВ/дел, развертка 10 мс); 2 – напряжение разряда (цена деления 13.5 кВ/дел, развертка 10 мс); 3 – ток разряда (цена деления 3мА/дел, развертка 1 мс).

При достижении пробойного напряжения между электродами происходит разряд с частотой 100 Гц (рис. 2.12, луч 2), где на каждый период еще накладываются пробои с частотой около 1 кГц (рис. 2.12, луч 3), что подтверждается и скоростной видеорегистрацией процесса пробоя (рис. 2.13). Анализ ВАХ и скоростной съемки показывает, что количество пробоев в каждой серии частоты 100 Гц не постоянно и варьирует от 1 до 6. При этом максимальное амплитудное значение напряжения составляет ~ 110 кВ, с учетом коэффициента деления k и величины токоограничивающего сопротивления R_0 максимальное амплитудное значение тока ~ 10 мА.

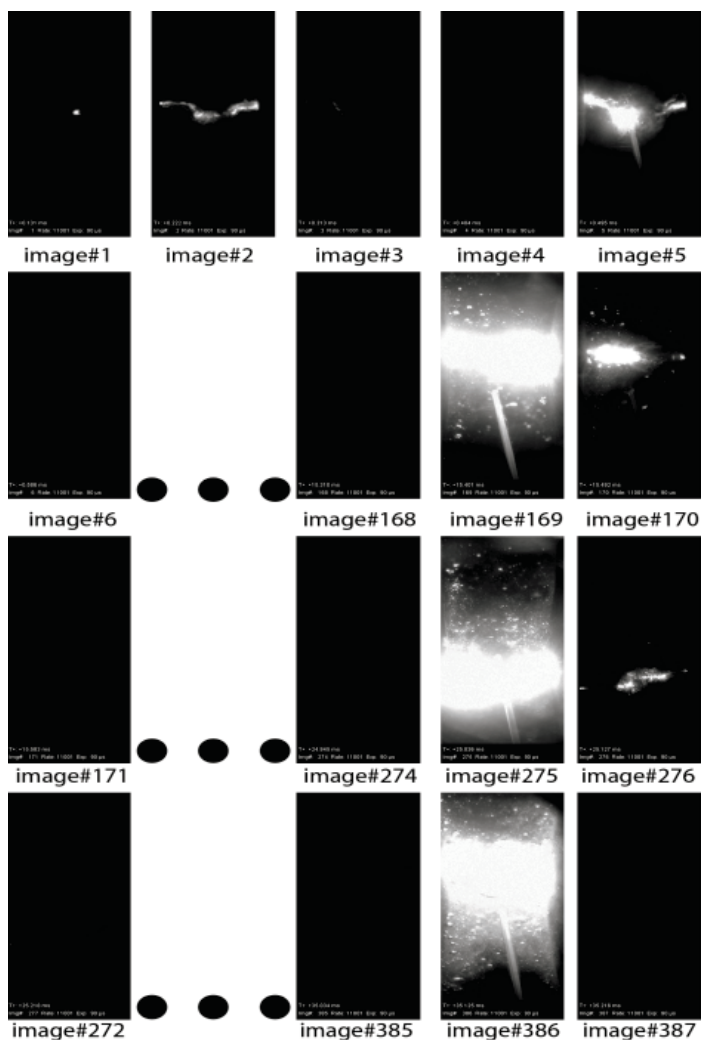


Рис. 2.12. Кадры при скоростной визуализации процесса пробоя трансформаторного масла с частотой 11001 кадров/с и экспозицией 90 мкс.

2.4. ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРОБОЯ В ДВУХФАЗНЫХ СРЕДАХ

На втором этапе исследований для оценки относительного влияния пузырьков газа на пробивное напряжение, проводились исследования разряда чистого трансформаторного масла (без учета химической чистоты и влажности исходного масла) и масла с пузырьками элегаза или воздуха при следующих условиях:

- пробой неподвижного и отстоявшегося масла;

- пробой проточного с расходом 2 л/мин масла без газа;
- пробой проточного с расходом 2 л/мин масла газированного элегазом или воздухом с объемной долей газа в масле 3 %;
- пробой проточного с расходом 2 л/мин масла газированного элегазом или воздухом с объемной долей газа в масле 10 %;
- пробой неподвижного чистого трансформаторного масла с одиночными пузырьками элегаза, воздуха, аргона или гелия диаметром ~1 мм;
- пробой нового и трансформаторного масла при воздействии ультразвукового излучателя.

При этом каждый раз при газации пузырьками различных газов масло менялось на аналогичное отстоявшееся новое масло. Напряжение между электродами увеличивалось постепенно до возникновения пробоя. На рис. 2.13 и 2.14 приведены значения напряжения пробоя чистого, газированного с объемной долей газа до 10 % и с одиночными пузырьками различных газов трансформаторного масла.

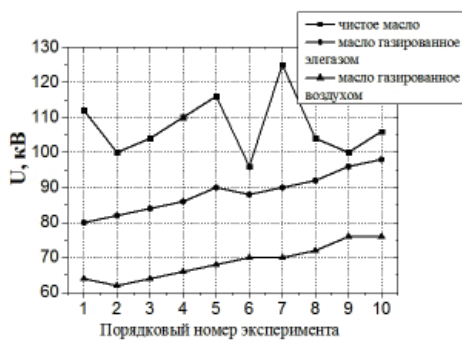


Рис. 2.13. Пробивное напряжение чистого и проточного газированного воздухом и элегазом трансформаторного масла с объемной долей газа до 10 %.

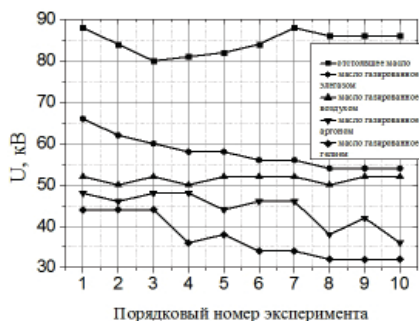


Рис. 2.14. Пробивное напряжение трансформаторного масла чистого и с одиночными пузырьками элегаза, воздуха, аргона и гелия.

Из рис. 2.13 видно, что наибольшим пробивным напряжением обладает проточное чистое масло, очевидно, обусловленное удалением продуктов распада масла из разрядного промежутка [10, 16]. Пузырьки газа снижают пробивное напряжение среды, при этом пузырьки воздуха снижают больше, чем пузырьки элегаза, т.к. электрическая прочность газов значительно ниже электрической прочности трансформаторного масла и поэтому частичный разряд может происходить в газовом пузырьке в полях меньших, чем необходимо для пробоя масла [17–19].

На следующем этапе исследований между электродами с помощью иглы создавали одиночные пузырьки элегаза, воздуха, аргона или гелия радиусом порядка $R=0.1$ см (рис. 2.1) для оценки относительного влияния пузырька на электрический пробой отстоявшегося трансформаторного масла без учета химической чистоты и влажности исходного масла. При этом каждый раз при газации одиночными пузырьками различных газов масло менялось на

аналогичное отстоявшееся масло. Напряжение между электродами увеличивали постепенно до возникновения пробоя.

Скоростная съемка показала, что в масле на значительном расстоянии от электродов наблюдалась вспышка сферической формы (рис. 2.15). Яркое белое пятно внутри сферы связано слабосветящимися каналами с ее поверхностью. При напряжениях между электродами меньших, чем необходимо для пробоя масла, сначала пробой происходит в газовом пузырьке и не всегда сопровождается перекрытием разрядного промежутка высокопроводящим каналом.

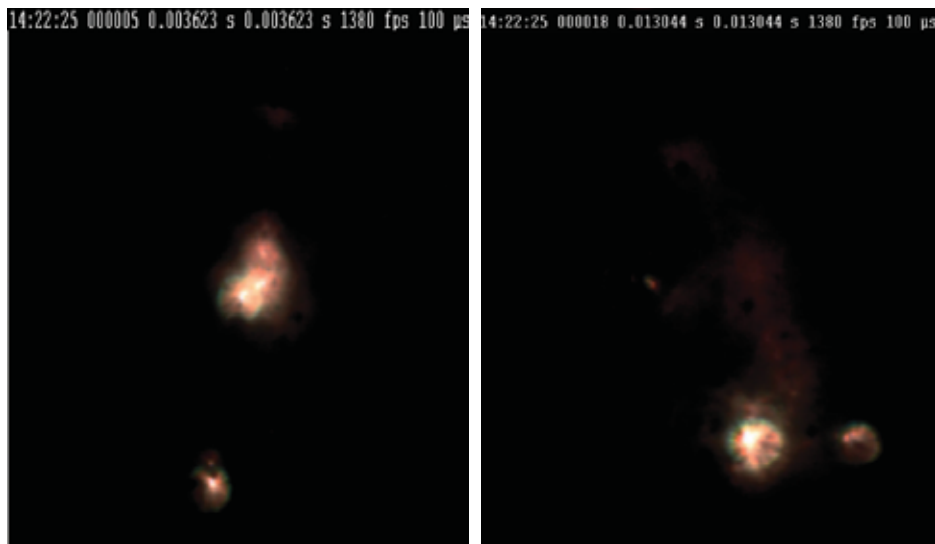


Рис. 2.15. Скоростная визуализация процесса пробоя пузырька с газом.

До полного перекрытия промежутка наблюдался многократный пробой в пузырьке с частотой несколько сотен Гц. В типичном эксперименте интервалы между четырьмя последовательными разрядами в пузырьке в миллисекундах оказались следующими: 3.62; 5.80; 1.45.

Установлено, что газация трансформаторного масла одиночными пузырьками различных газов также снижает пробивное напряжение масла (рис. 2.14). Так, например, пробой отстоявшегося старого масла происходит при $U_{\text{ср}} \approx 85$ кВ. Газация одиночными пузырьками приводит к снижению пробивного напряжения: ~58 кВ – элегаз, 51 кВ – воздух, 44 кВ – аргон, 37 кВ – гелий. Очевидно, что при напряжении между электродами меньше, чем необходимо для пробоя масла, сначала пробой происходит в газовом пузырьке и не всегда сопровождается перекрытием разрядного промежутка высокопроводящим каналом [17].

Во время одного пробоя длительностью ~ 100 мкс максимальное амплитудное значение напряжения и тока составляет ~ 80 кВ и 10 мА соответственно (ток разряда ограничен резисторами). Такая же картина наблюдается и при использовании пузырьков воздуха [19].

За время одного пробоя в разрядном промежутке выделяется энергия:

$$W_p = U_a I_a t_p \approx 0.08 \text{ Дж} \quad (2.1)$$

где U_a – амплитудное значение напряжения разряда (~ 80 кВ), I_a – амплитудное значение тока разряда (~ 10 мА), t_p – время разряда (~ 100 мкс).

В нашем случае деформацию пузырька можно оценить из выражения [6]:

$$\Delta = \frac{9r\epsilon_0}{32\sigma} E_m^2 (\epsilon_m - 3.2) \quad (2.2)$$

где Δ – эксцентриситет эллипсоида пузырька, r – радиус пузырька, E_m – напряженность поля в масле, σ – поверхностное натяжение масла, ϵ_m – диэлектрическая проницаемость масла.

Изменение давления в пузырьке под действием электрического поля в неполярных диэлектриках можно найти из выражения [6]:

$$\Delta p = -\frac{p + \frac{2\sigma}{r}}{p + \frac{4\sigma}{3r}} \cdot \frac{\epsilon_0(\epsilon_m - 1)^3}{2(2\epsilon_m + 1)} \cdot E_m^2 \quad (2.3)$$

где p – давление в масле.

Для внешнего электрического поля с напряженностью $E_0 = 100$ кВ/см, $\epsilon_m \approx 2.2$, и $r \approx 0.1$ см, $\sigma \approx 40 \cdot 10^{-3}$ Н/м в трансформаторном масле марки ГК при атмосферном давлении из формул (2.2) и (2.3) с учетом $E_m = E_0/\epsilon_m$ имеем, что $\Delta \approx -1.3 \cdot 10^{-4}$ м, $\Delta p \approx -3 \cdot 10^{-3}$ атм. Пузырек воздуха в наших условиях под действием электрического поля испытывает незначительную деформацию и сохраняет свою сферичность, а изменения давления внутри практически не происходит.

По Фрейнману [20] электрическое поле E в сферической полости жидкого диэлектрика определяется из выражения:

$$E = E_m + \frac{P_0}{3\epsilon_0} \quad (2.4)$$

где P_0 – дипольный момент пузырька до пробоя, который можно определить по формуле [21]:

$$P_0 = \epsilon_0 E (\epsilon - 1) \quad (2.5)$$

Окончательно для электрического поля в пузырьке имеем:

$$E = 3E_m \frac{1}{4 - \epsilon} = 3E_0 \frac{1}{\epsilon(4 - \epsilon)} \quad (2.6)$$

Принимая диэлектрическую проницаемость газа равной единице, для оценки электрической энергии в пузырьке до пробоя имеем:

$$W_0 = \frac{2}{3} \pi \epsilon_0 r^3 E^2 \quad (2.7)$$

В неполярном диэлектрике часть энергии затрачивается на поляризацию диэлектрика и электрическая энергия в диэлектрике определяется из выражения [22]:

$$W_k = \frac{4}{6} \pi r^3 \varepsilon_0 (\varepsilon - 1) E_m^2 \quad (2.8)$$

Энергия, выделяющаяся в пузырьке при однократном пробое:

$$\text{Дж, } (W_0 \approx 10^{-4} \text{ Дж, } W_k \approx 5 \cdot 10^{-5} \text{ Дж}) \quad (2.9)$$

Одиночный пузырек газа, являясь эпицентром зарождения пробоя, при однократном пробое выделяет очень мало энергии (2.9) по сравнению с пробоем самого масла (1), что незначительно изменит температуру прилегающего масла и не повлияет на механизм пробоя. При постоянно действующих напряжениях, которые значительно ниже пробивного для масла, но достаточны для пробоя газа, в промежутке наблюдаются пробои пузырька с частотой до 1 кГц, которые с течением времени также приводят к перекрытию разрядного промежутка проводящим каналом (рис. 2.12), очевидно связанное с тем, что многочастотные пробои могут изменить температуру прилегающего масла и повлиять на напряжение пробоя масла.

В воздухе при $E/p > 41$ В/см·Торр размножение электронов превалирует над прилипанием [23], тогда из условия лавинно-стримерного перехода можно оценить минимальные значения напряженности электрического поля E_{min} для воздуха достаточного для пробоя пузырька $r \approx 0.1$ см:

$$\alpha d > 20 \quad (2.10)$$

где α – эффективный коэффициент размножения, который для наших условий $\alpha > 100$ см⁻¹.

Для вычисления эффективного коэффициента размножения ($\alpha = \alpha_i - \alpha_a$) используются аппроксимации для коэффициента объемной ударной ионизации α_i и коэффициента прилипания электронов α_a [24]:

$$\alpha_i/p = 1.3 \cdot 10^{-4} (E/p - 28)^2, \text{ для } 35 \leq E/p < 100 \text{ В/см} \cdot \text{Торр} \quad (2.11)$$

$$\alpha_a/p = 0.013 \left(1 - \left(\frac{E/p - 38}{162} \right) \right), \text{ для } 38 \leq E/p < 200 \text{ В/см} \cdot \text{Торр} \quad (2.12)$$

Оценки показывают, что в воздухе $\alpha > 100$ см⁻¹ при $E_{min}/p > 62$ В/см·Торр или $E_{min} > 47$ кВ/см.

Для элегаза размножение электронов начинает превалировать над прилипанием [25] при $E/p > 94$ В/см·Торр и для эффективного коэффициента размножения можно для наших условий использовать аппроксимацию:

$$\alpha/p = 2.87 \cdot 10^{-2} E/p - 2.7 \quad (2.13)$$

Тогда в элегазе $\alpha > 100$ см⁻¹ при $E_{min}/p > 98$ В/см·Торр или $E_{min} > 75$ кВ/см.

Наличие пузырька газа $r \approx 0.1$ см в масле снижает напряжение пробоя, но всегда остается больше, чем необходимое напряжение пробоя пузырька с

газом, что и наблюдается в эксперименте. Используя условие (2.10), аппроксимации (2.11) и (2.12) для воздуха и (2.13) для элегаза можно оценить и размер пузырька газа, когда не будет наблюдаться пробой пузырька: при $E_0=100$ кВ/см для воздуха $r<0.1$ мм, а для элегаза $r<0.125$ мм.

2.5. Влияние ультразвука на электрический пробой в газожидкостных средах

Известно, что под действием ультразвуковых волн в жидком диэлектрике [27] происходит возмущение среды, приводящие к чередованию повышенного и пониженного давления, разрыву жидкости и образованию кавитационных пузырьков из продуктов распада диэлектрика или растворенных в жидкости газов, которые изначально присутствуют в жидком диэлектрике. В работе [28] показана возможность применения микроволн для дегазации жидкости, что является актуальным и при, например, нарушении герметичности маслонаполненного оборудования и проникновении воздуха. Поэтому было исследовано влияние маломощного ультразвукового излучения на напряжение пробоя трансформаторного масла. Источником ультразвуковых волн с частотой 42.5 кГц является пьезоэлектрический излучатель мощностью $1 \div 1.5$ Вт/см². Выбор мощности излучения $1 \div 1.5$ Вт/см² связан с тем, что в трансформаторном масле при мощности излучения ≥ 2 Вт/см² происходит разложение масла с выделением продуктов распада [11]. Измерения напряжения пробоя проводились при следующих условиях:

1. пробой чистого нового масла без ультразвука в зависимости от времени отстаивания масла;
2. пробой чистого нового масла с расположением излучателя сверху от электродов в зависимости от времени воздействия ультразвука;
3. пробой чистого нового масла с расположением излучателя снизу от электродов в зависимости от времени воздействия ультразвука;
4. пробой старого масла без ультразвука в зависимости от времени отстаивания масла;
5. пробой старого масла с расположением излучателя сверху от электродов в зависимости от времени воздействия ультразвука;
6. пробой старого масла с расположением излучателя снизу от электродов в зависимости от времени воздействия ультразвука.

В таблице 2.1 приведены усредненные значения напряжения пробоя трансформаторного масла для различных условий эксперимента.

Таблица 2.1. Напряжение пробоя трансформаторного масла.

, мин	U, кВ чистое масло, без ультр.	U, кВ чистое масло, ультр. сверху	U, кВ чистое масло, ультр. снизу	U, кВ старое масло, без ультр.	U, кВ старое масло ультр. сверху	U, кВ старое масло ультр. снизу
1	74	78	85	50	55	60
5	80	63	78	57	50	56
30	85	67	107	60	53	70
60	92	101	119	63	65	73

Из таблицы 2.1 видно, что наибольшим пробивным напряжением обладает чистое трансформаторное масло после воздействия в течение 60 мин ультразвуком с расположением излучателя под электродами.

На рис.2.16 и 2.17 приведены зависимости пробивного напряжения для чистого и старого масла от времени отстаивания и воздействия ультразвука. Из рисунков видно, что по мере отстаивания как чистого, так и старого масла происходит увеличение напряжения пробоя на ~20 % за 60 мин. Наблюдаемое уменьшение напряжения пробоя на первых минутах работы ультразвука по отношению к чистому маслу связано с тем, что происходит интенсивная дегазация масла с образованием кавитационных пузырьков из растворенных газов. Как отмечалось выше, в газовом пузырьке в полях меньших, чем необходимо для пробоя масла, могут происходить частичные разряды, что на начальном этапе воздействия ультразвука приводит к уменьшению напряжения пробоя среды.

Из рис.2.16 и 2.17 видно также, что после 30 мин воздействия ультразвука при расположении излучателя под электродами напряжение пробоя чистого масла увеличивается на ~20 кВ, а старого масла – на ~10 кВ. При расположении излучателя сверху, наоборот, напряжение пробоя в чистом масле через 30 минут воздействия на ~18 кВ и в старом масле – на ~7 кВ ниже, чем в неподвижном отстоявшем в течении 30 мин масле.

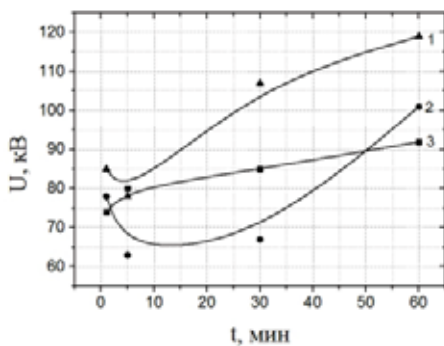


Рис. 2.16. Зависимость пробивного напряжения чистого трансформаторного масла от времени: 1 – ультразвуковой излучатель расположен снизу электродов; 2 – ультразвуковой излучатель расположен сверху электродов; 3 – без ультразвукового излучателя

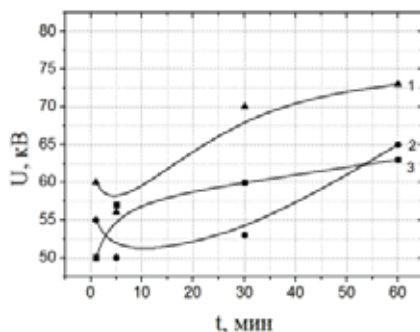


Рис.2. 17. Зависимость пробивного напряжения старого трансформаторного масла от времени: 1 – ультразвуковой излучатель расположен снизу электродов; 2 – ультразвуковой излучатель расположен сверху электродов; 3 – без ультразвукового излучателя

Воздействие ультразвука при расположении излучателя снизу электродов в течение 60 мин повышает напряжение пробоя в чистом масле на ~30 кВ, в старом – на ~10 кВ. При расположении излучателя над электродами напряжение пробоя через 60 минут воздействия на ~10 кВ в чистом и ~2 кВ в старом масле больше, чем в соответствующем отстоявшемся трансформаторном масле.

2.6. Возникновение частичных разрядов в двухфазных средах

Таким образом, исследования относительного влияния микропузырьков воздуха и элегаза на величину пробойного напряжения микропузырьковой среды без учета химической чистоты и влажности исходного трансформаторного масла показало, что пробойи происходят с постоянной частотой удвоителя 100 Гц, где на каждый период накладываются разряды с частотой до 1 кГц. С учетом погрешности измерений наиболее близким к пробивному напряжению чистого трансформаторного масла является проточная газированная элегазом двухфазная среда. Несмотря на чуть меньшее напряжение пробоя, преимуществом такой среды перед чистым маслом могут служить демпфирующие свойства двухфазной среды, что может быть достаточным для предотвращения разрушения корпуса маслонаполненного оборудования при пробое. Одиночные пузырьки электроотрицательных газов радиуса 1 мм снижают пробивное напряжение трансформаторного масла, при этом воздух больше, чем элегаз. Из условия лавинно-стримерного перехода найдено необходимое минимальное значение напряженности электрического поля для пробоя пузырька, что удовлетворительно согласуется с результатами эксперимента. Так же оценен минимальный размер пузырька газа, когда пробой в пузырьке не будет наблюдаться при полях достаточных для пробоя масла. Результаты экспериментальных исследований также показали, что при воздействии на трансформаторное масло ультразвуковыми волнами малой мощности ($<2 \text{ Вт/см}^2$) в начальный период времени пробивное напряжение трансформаторного масла снижается по отношению как чистому, так и старому маслу, что связано с дегазацией и возникновением кавитационных пузырьков. С увеличением времени воздействия ультразвука напряжение пробоя растет нелинейно. Полученные экспериментальные данные говорят о возможности применения ультразвуковых волн малой мощности для дегазации чистого и старого трансформаторного масла.

Сделан вывод о стабилизации напряжения пробоя в такой среде вследствие преобладания процесса развития основного замыкающего искрового разряда через **частичные разряды в пузырьках элегаза**, а не вследствие случайных изменений состава среды и состояния электродов.

Данный раздел содержит результаты по электрической прочности смесей трансформаторного масла с элегазом и воздухом в ограниченной, но практически важной области параметров, в последующих экспериментах необходимо расширить область параметров и обеспечить проведение чистых экспериментов с тщательной подготовкой сред и разрядной камеры, а также численное и экспериментальное исследование демпфирующих свойств смеси трансформаторного масла и элегаза в рабочих и критических условиях работы высоковольтных трансформаторов и создания газожидкостной среды, достаточной для предотвращения разрушения корпуса маслонаполненного оборудования.

Литература

1. *Накоряков В.Е., Покусаев Б.Г., Шрейбер И.Р.* Распространение волн в газо- и парожидкост-ных средах. Новосибирск: Институт теплофизики, 1983. 237 с.
2. *Низматулин Р.И.* Динамика многофазных сред в 2-х частях. М.: Наука, 1987.
3. *Сычев А.И.* Сильные ударные волны в пузырьковых средах // ЖТФ. 2010. Т. 80. №6. с. 31
4. *Nakoryakov V.E., Kuznetsov V.V., Dontsov V.E., Markov P.G.* Pressure waves of moderate intensity in liquid with gas bubbles // Int. J. Multiphase Flow. 1990. Vol. 16, No. 5, p. 741
5. *Бейер М., Бёк В., Мёллер К., Цаенгль В.* / Под ред. Ларионова В.П. Техника высоких напряжений: теоретические и практические основы применения. М.: Энергоатомиздат, 1989. 555 с.
6. *Ушаков В.Я., Клишкин В.Ф., Коробейников С.М., Лопатин В.В.* Пробой жидкостей при импульсном напряжении. Томск: Изд-во НТЛ, 2005. 488 с.
7. *Коробейников С.М.* О роли пузырьков в электрической прочности жидкостей. 1. Предпробивные процессы // Теплофизика высоких температур. 1998. Т. 36. № 3. с.
8. *Коробейников С.М., Мелехов А.В., Бесов А.С.* Зажигание разряда в воде с помощью пузырьков // Теплофизика высоких температур, Т. 40. N 5. 2002.
9. *Гаджиев М.Х., Тюфтяев А.С., Акимов П.Л., Саргсян М.А., Демиров Н.А.* Экспериментальная установка для исследования пробоя двухфазных сред на основе трансформаторного масла и пузырьков газа // Прикладная Физика. 2016. № 5. С. 10–15.
10. *Son E.E., Tyufyaev A.S., Gadzhiev M.Kh., Kulikov Y.M., Panov V.A., Akimov P.L.* Electrical Breakdown Voltage of Transformer Oil with Gas Bubbles // High Temperature, Rep. 52(5), 770 (2014).
11. *Гаджиев М.Х., Тюфтяев А.С., Ильичев М.В.* Одиночный пузырек электроотрицательного газа в трансформаторном масле под действием электрического поля // ЖТФ. №10. 2017. С. 1493–1497.
12. *Parmar R., Majumder S.K.* Microbubble generation and microbubble-aided transport process intensification // A state-of-the-art report, Chemical Engineering and Processing 64 (2013) 79–97.
13. Методы исследования плазмы. /Под ред. В.Лохте-Хольтгревена, М., Мир, 1971, 552 с.
14. *R. Schaller, Ch. Hollenstein, M. Rappaz, G. Wälder, J. Winter* “Characterization of electrical discharge machining plasmas” THESE NO 3542 (2006) Lausanne, EPFL 2006.
15. *Торшин Ю.В.* Физические процессы формирования пробоя конденсированных диэлектриков. М.: Энергоиздат. 2008. 212 с.
16. *Гаджиев М.Х., Исакаев Э.Х., Тюфтяев А.С., Акимов П.Л., Юсупов Д.И., Куликов Ю.М., Панов В.А.* Электрический пробой трансформаторного масла с пузырьками элегаза и воздуха // ЖТФ. 2015. №7. С.156–158.

17. Недоспасов А. В., Исакаев Э. Х., Тюфтяев А. С., Гаджиев М. Х. О влиянии одиночных пузырьков газа на электрический пробой трансформаторного масла // ЖТФ. №7. 2015. С. 142–143.

18. Babaeva N. Yu., Tereshonok D. V., Naidis G. V. Initiation of breakdown in bubbles immersed in liquids: pre-existed charges versus bubble size // Journal of Physics D: Applied Physics. 2015. Vol. 48. No. 35. P. 355201.

19. Гаджиев М.Х., Тюфтяев А.С., Ильичев М.В. Одиночный пузырек электроотрицательного газа в трансформаторном масле под действием электрического поля // ЖТФ. 2017. Том.87. Вып.10. С. 1493–1497.

20. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике 5. Электричество и магнетизм: Издательство «Мир», Москва, 1977. 306 с.

21. Тамм И.Е. Основы теории электричества: Учеб. Пособие для вузов. 11-е изд., испр. и доп. М.: ФИЗМАТЛИТ., 2003. 616 с.

22. Яворский Б.М., Детлаф А.А., Лебедев А.К. Справочник по физике для инженеров и студентов вузов. 8-е изд., перераб. и испр. М.: ООО «Издательство Оникс»: ООО «Издательство Мир и Образование». 2006. 1056 с.

23. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект». 2009. 736 с.

24. Козлов Б.А., Соловьев В.И. Численное моделирование стационарной отрицательной короны в воздухе //ЖТФ. №5. 2009. С.18–28.

25. Бойченко А.М., Ткачев А.Н., Яковленко С.И. Коэффициент Таунсенда и убегание электронов в электроотрицательном газе // Письма в ЖЭТФ. 2003. Т.78. В.11. С.1223–1227.

26. Гаджиев М.Х., Тюфтяев А.С., Исакаев Э.Х., Сон Э.Е., Акимов П.Л. Влияние ультразвукового излучения на напряжение пробоя трансформаторного масла // Известия РАН. Энергетика. 2018. №2. С. 36–40.

27. Маргулис М.А. Основы звукохимии. М.: Высшая школа, 1984. 272 с.

28. Емец Б.Г. Эффективное извлечение газа из жидкости с помощью микроволн при практически неизменной температуре // Письма в ЖТФ. 1996. Т. 22. Вып. 8. С. 22–24.

29. Дарьян Л.А. Интерпретация результатов хроматографического анализа газообразных продуктов разложения трансформаторных масел при воздействии ультразвуковой кавитации // ЭЛЕКТРО. № 1. 2011. С.1–7.

ГЛАВА 3. ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ИЗОЛЯЦИОННЫХ РАСТИТЕЛЬНЫХ МАСЕЛ

Высоковольтное электрооборудование, в котором трансформаторное масло применяется в качестве основной изолирующей и охлаждающей среды, занимает доминирующее положение в электроэнергетике уже более века, с тех пор, когда Тесла поместил катушку в прокипяченное минеральное масло. Во многом использование масла объясняется прекрасными физико-химическими и диэлектрическими свойствами трансформаторного масла. Кроме того, минеральное масло обладает ценными диагностическими признаками и обеспечивает эксплуатационников информацией о техническом состоянии оборудования по содержанию растворенных в масле газов. Были подготовлены нормативные документы, ставшие настольными книгами в десятках химических лабораторий, была разработана серия аналитических приборов и методик. Во всех этих методиках неявно предполагается установление равновесия между газом в газовой фазе и растворенным газом в жидкости. При этом установление самого факта равновесия производится экспериментальным путем для каждой конкретной ситуации. Механизмы установления равновесия рассмотрены в настоящей монографии, подчеркнем, что в этих процессах определяющую роль играют коэффициенты диффузии диагностических газов, а также их коэффициенты растворимости. Для минерального трансформаторного масла коэффициенты растворимости нормативно определены [1], коэффициенты диффузии также оценены ранее [2, 3].

Использование минеральных трансформаторных масел оправдано, помимо ранее упомянутых диэлектрических свойств, хорошими свойствами теплопередачи, стабильностью против окисления, совместимостью с целлюлозной изоляцией и низкой ценой. Однако использование минерального масла представляет значительную угрозу для окружающей среды из-за его стойкости к разложению микроорганизмами. Плохая биоразлагаемость создает сложности в утилизации отработавшего свой срок службы масла. Кроме того, из-за относительно невысоких температур вспышки и горения минеральных масел оборудование, заполненное ими, является пожароопасным и требует значительных усилий по обеспечению взрыво- и пожаробезопасности. По указанным причинам в 80-х годах прошлого века начался новый этап в разработке альтернативных диэлектрических жидкостей, быстро разлагаемых микроорганизмами и имеющих повышенные температуры вспышки и воспламеняемости. В качестве изолирующих жидкостей, альтернативных минеральному маслу, рассматриваются силиконовое масло и эфиры натурального или искусственного происхождения. На их основе созданы электроизоляционные жидкости растительного происхождения: Envirotemp FR3, Midel 7131, Biotemp, DialaMX, успешно работающие в силовых трансформаторах. Разумеется, сведения о составе этих жидкостей и технологии их изготовления являются конфиденциальными по коммерческим соображениям.

В России масштаб разработок экологически дружелюбных жидких диэлектрических жидкостей заметно уступает зарубежному. В периодических

изданиях практически отсутствуют сведения об исследованиях, проводимых в указанном направлении. Вместе с тем решение проблемы становится всё более необходимым, поэтому создание отечественных жидкостей и промышленное освоение их производства весьма и весьма актуальны.

Информация по свойствам альтернативных электроизоляционных жидкостей, как правило, является коммерческой тайной. Поэтому при рассмотрении физико-химических свойств рапсового масла основывались на собственных исследованиях, проведенных в Новосибирском государственном техническом университете [4, 5, 6].

В настоящей главе описаны характеристики, включая коэффициенты растворимости и диффузии основного компонента новых электроизоляционных жидкостей, в первую очередь рапсового масла.

3.1. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ РАПСОВОГО МАСЛА

Для экспериментального определения характеристик рапсового масла были использованы существующие на данный момент методы и аппаратура для анализов трансформаторных масел, имеющих минеральную основу. Экспериментальная часть работы проводилась на базе аккредитованной испытательной лаборатории Филиала АО «Электросетьсервис ЕНЭС» – СПб «Электросетьремонт» [6].

Растительные масла состоят главным образом (на 95–97 %) из триацилглицеридов – сложных эфиров глицерина и различных жирных кислот, а также моно- и диацилглицеридов. Ацилглицериды, в свою очередь, содержат в своем составе молекулы различных жирных (карбоновых) кислот, связанных с молекулой глицерина $C_3H_5(OH)_3$ [7]. Основными компонентами рапсового масла являются ненасыщенные и насыщенные жирные кислоты в составе ацилглицеридов, незначительную часть составляют остальные компоненты (фосфолипиды, стеринны, пигменты, витамины, углеводороды, белки, свободные жирные кислоты и др.).

В период с 2002 по 2012 г. несколько раз происходили замены стандартов на товарное рапсовое масло. Так, сначала характеристики производимых в нашей стране масел нормировались ГОСТом 8988–2002 «Масло рапсовое. Технические условия». Затем данный ГОСТ был отменен и ему на смену введен ГОСТ Р 53457–2009. С 2012 г. по настоящее время действует ГОСТ 31759–2012 «Масло рапсовое. Технические условия» [8] (таблица 3.1).

Масло для исследования имело следующие показатели, представленные производителем в удостоверении качества:

- кислотное число – 0,11 мл КОН/г;
- перекисное число – 0,93 ммоль/кг;
- массовая доля влаги и летучих веществ – 0,02 %;
- массовая доля эруковой кислоты в масле, %, к сумме жирных кислот – не более 2 %.

Из всех кислот, входящих в состав рапсового масла, эруковая считается опасной для употребления в пищу в определенных концентрациях. Поэтому

«пищевые» марки масел проходят специальную подготовку и контроль по данному показателю.

Таблица 3.1. Физико-химические показатели рапсового масла

Наименование показателя	Значение показателя рапсового масла марок			Нерафинированного
	Рафинированного			
	Дезодорированного высшего сорта	первого сорта	Недезодорированного	
Кислотное число, мг КОН/г, не более	0,30	0,40	0,40	6,0
Массовая доля нежировых примесей, %, не более	Отсутствие			0,20
Массовая доля фосфора, мг/кг, не более	20			800
- в пересчете на стеароолеолецитин, %, не более	0,05			2,0
Мыло (качественная проба)	Отсутствие			Не нормируется
Массовая доля влаги и летучих веществ, %, не более	0,10			0,30
Массовая доля эруковой кислоты, % к сумме жирных кислот, не более	2			5
Температура вспышки экстракционного масла, °С, не ниже	Не нормируется			225
Перекисное число, ммоль активного кислорода/кг, не более	4,0			10,0
Анизидиновое число, не более	3,0			Не нормируется

3.2. ПОКАЗАТЕЛИ, СЛАБО ЗАВИСЯЩИЕ ОТ ПРИРОДЫ ДИЭЛЕКТРИКА

3.2.1. Цвет и мутность. Цвет определялся по стандартной методике [9], на компараторе для определения цвета. Цвет масла составил 0,5 единицы (1-я и 2-я партии).

Мутность масла была определена через значение оптической плотности масла при длине волны пропускаемого света 490 нм на приборе КФК-3 по методике, описанной в [9]. Этот показатель говорит о накоплении в масле коллоидных частиц и определяется для герметичных вводов. Мутность рапсового масла составила $9,95 \text{ м}^{-1}$ (1-я партия) и $8,37 \text{ м}^{-1}$ (2-я партия). Это хороший показатель качества, если учесть, что граничное допустимое значение для трансформаторного масла, при котором коллоидные частицы достигают опасной для эксплуатации величины 100 А, составляет 40 м^{-1} .

3.2.2. Плотность. Плотность масла измерялась с помощью ареометра с диапазоном значений от 880 до 940 кг/м³. При $T = +20 \text{ °C}$ составила 918

кг/м³, при $T = +24^{\circ}\text{C}$ – 916 кг/м³. В ходе определения поверхностного натяжения масла тензиометром плотность рапсового масла была определена повторно и при $T = +20^{\circ}\text{C}$ ее величина оказалась той же: $\rho = 918$ кг/м³. Как и у большинства жидкостей, при повышении температуры плотность масла снижается.

3.2.3. Диэлектрическая проницаемость. Относительная диэлектрическая проницаемость характеризует степень поляризации диэлектрической среды под действием электрического поля. В статическом электрическом поле для большинства твердых и жидких диэлектриков значение ϵ лежит в интервале от 2 до 8. Значение ϵ велико для веществ с молекулами, обладающими большим электрическим дипольным моментом. Для трансформаторных масел $\epsilon = 2,2\text{--}2,4$ [10]. Исследование диэлектрических свойств рапсового масла проводилось на тестере трансформаторного масла BAURDTL.

Измерение проводилось при 90°C в соответствии с требованиями ИЕС 60247:2004. Диэлектрическая проницаемость для товарного рапсового масла составила $\epsilon = 2,83$ (1-я партия) и $\epsilon = 2,84$ (2-я партия).

3.2.4. Показатель преломления. По Максвеллу диэлектрическая константа неполярных жидкостей почти не отличается от квадрата показателя преломления:

$$\epsilon = n_D^2. \quad (3.1)$$

Наличие разницы между этими величинами говорит о появлении полярных молекул, коллоидных частиц и шлама. Для контроля процесса образования шлама на практике пользуются коэффициентом Вермана, K_V :

$$K_V = \epsilon - n_D^2 \quad (3.2)$$

Если $K_V < 0,05$, то содержание полярных окисленных углеводов не угрожает выпадением кислого шлама на бумажные обмотки твердой изоляции [11]. Напротив, при $K_V \geq 0,05$ в масле происходит процесс образования коллоидных структур.

Для расчета коэффициента Вермана и для сравнительного анализа с традиционным минеральным маслом был определен показатель преломления рапсового масла на рефрактометре.

Показатель преломления рапсового масла при $22,4^{\circ}\text{C}$ составил $n_D = 1,4743$, а рассчитанное значение коэффициента Вермана составило $K_V = 0,67$, что на порядок больше указанного выше граничного значения $0,05$ для трансформаторного масла.

3.2.5. Вязкость. Кинематическая вязкость рапсового масла была определена при разных температурах (20°C , 30°C , 40°C). При определении вязкости использовался криотермостат КРИО-ВИС-Т-06-01; вискозиметр капиллярный стеклянный ВПЖ-2 (внутренний диаметр капилляра $0,73$ мм) и секундомер СОП пр-2а-2-010 «Агат» 4282Н.

Значения вязкости приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2. Результаты измерения вязкости рапсового масла при разных температурах

Температура, °С	20	30	40
Время истечения, с	2271	1513	1059
Кинематическая вязкость, мм ² /с	71,01	48,42	33,11

Из полученных результатов видно, что вязкость рапсового масла выше вязкости трансформаторного масла примерно в три раза. Она уменьшается примерно в 1,5 раза при повышении температуры масла на 10 °С.

3.3. ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ РАПСОВОГО МАСЛА. СВОЙСТВА МАСЛА, ЗАВИСЯЩИЕ ОТ ПРИСУТСТВИЯ ПОСТОРОННИХ ПРИМЕСЕЙ

3.3.1. Пробивное напряжение. Пробивное напряжение является важнейшим показателем качества масла, который характеризует способность жидкого диэлектрика выдерживать электрическое напряжение без пробоя, то есть определяет безаварийную работу всей системы изоляции оборудования. Значение пробивного напряжения зависит от температуры испытуемого масла, влажности и наличия примесей. Сухое и чистое масло обладает высоким пробивным напряжением. Наличие в масле очень небольшого количества влаги и различных примесей резко снижает его электрическую прочность.

Результаты измерений пробивного напряжения товарного рапсового масла при помощи аппарата АИМ-90 в стандартной ячейке приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3. Пробивное напряжение рапсового масла ($U_{пр}$), кВ

№ партии	№ пробоа							Кoeffициент вариации k_v , %
	1	2	3	4	5	6	U_{cp}	
1-я	83	76	86	69	67	82	77,2	4,1
2-я	68	71	75	71	62	77	70,6	3,1

Полученное среднее значение пробивного напряжения рапсового масла достаточно велико в сравнении с нефтяными трансформаторными маслами и удовлетворяет требованиям для масел, подготовленных к заливке в электрооборудование любых классов напряжения. Рассчитанный коэффициент вариации показывает, что разброс значений пробивного напряжения относительно среднего весьма невелик, следовательно, масло обладает стабильными электрическими характеристиками. Небольшие значения k_v говорят также о достоверности проведенного измерения.

3.3.2. Тангенс угла диэлектрических потерь. Диэлектрические потери в изоляционной жидкости обусловлены поляризацией молекул и проводимо-

стью диэлектрика [10]. Тангенс угла диэлектрических потерь ($tg\delta$) является показателем качества масла, чувствительным к присутствию в масле различных загрязнений (коллоидных мелкодисперсных частиц, растворимых металлоорганических соединений, различных продуктов старения масла и твердой изоляции). При частоте 50 Гц величина $tg\delta$ практически определяется только проводимостью, т.е. на изменение $tg\delta$ влияют только те виды загрязнения, которые повышают его электропроводность. Определение $tg\delta$ позволяет выявить незначительные изменения свойств масла даже при очень малой степени загрязнения, которые не определяются химическими методами контроля. Как правило, измерения проводятся при температуре 90 °С, а при необходимости при нескольких значениях температуры (например, при 20, 50 и 70 °С). Определение тангенса угла диэлектрических потерь масла со снятием прямой и обратной температурной зависимости производилось согласно ГОСТ 6581–75 на автоматизированной установке АСТ-2М.

Значения тангенса угла диэлектрических потерь рапсового масла, приведенные на рис. 3.1, велики в сравнении с данными для трансформаторных масел.

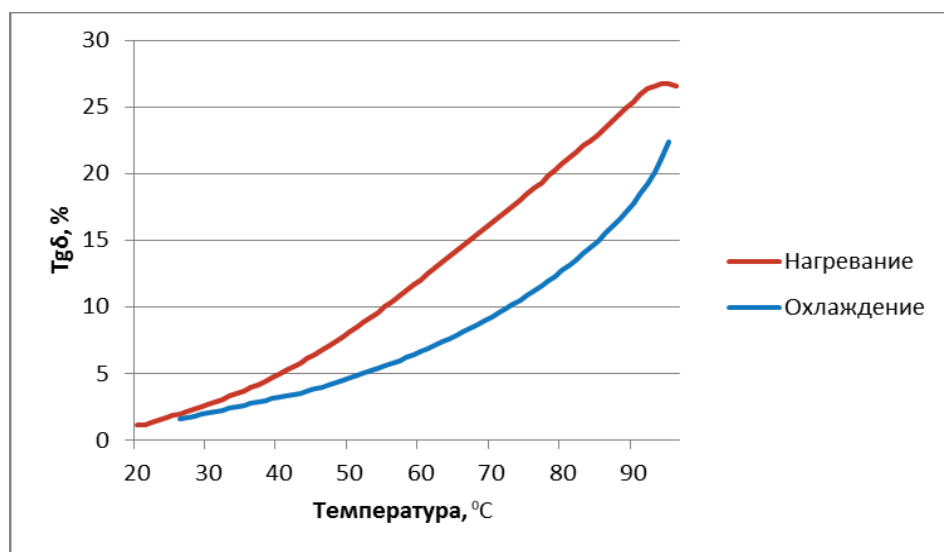


Рис. 3.1. Температурная зависимость $tg\delta$ рапсового масла

Высокое значение тангенса можно объяснить наличием в масле большого числа полярных продуктов, а также влаги. Определенная неустойчивость тангенса угла диэлектрических потерь может быть связана с высоким содержанием воды и с временами установления равновесия растворенной и эмульгированной воды в рапсовом масле.

3.3.3. Удельное объемное сопротивление. Измерения проводились на тестере трансформаторного масла BAURDTL по методике МЭК 247. При $T = 90$ °С удельное объемное сопротивление составило $1,74 \times 10^9$ Ом \times м (для 1-й партии масла), $\rho = 2,24 \times 10^9$ Ом \times м (для 2-й партии).

3.3.4. Количественное содержание воды в масле. Одним из основных источников ухудшения изоляционных свойств является содержащаяся в масле вода. Анализ на влагосодержание позволяет более точно оценить и прогнозировать диэлектрические свойства масла.

Вода, присутствующая в масле, может находиться в *связанной, растворенной и эмульсионной* формах, которые находятся между собой в состоянии динамического равновесия.

Содержание связанной воды определяется фракционным составом масла и примесей, которые присутствуют в масле при его изготовлении или образуются в результате старения масла. При этом образуются ассоциаты воды растворенной формы, например, с альдегидами, кетонами, спиртами и другими продуктами окисления или примесями.

Растворенная вода представляет собой истинный раствор, т.е. молекулы воды располагаются между молекулами углеводов масла, не взаимодействуя с ними. Растворимость воды в трансформаторном масле невелика (не более 50 г/т при комнатной температуре) и в обычных условиях эксплуатации в трансформаторе влагосодержание составляет не более 30 г/т. Главными факторами, от которых зависит растворимость воды в масле, являются температура масла, исходный химический состав масла и степень старения масла. Чем выше температура масла, тем больше воды растворяется в нем.

При снижении температуры масла растворимость воды снижается, и освободившиеся молекулы воды сливаются в мельчайшие (от единиц до десятков микрон) капли, образуя эмульсию. Появление эмульгированной воды приводит к резкому ухудшению диэлектрических свойств масла и в первую очередь к снижению электрической прочности конструкции в целом. По мере увеличения количества водной эмульсии мелкие капли воды сливаются в более крупные, которые под действием силы тяжести опускаются на дно аппарата, так как удельный вес воды больше, чем удельный вес масла. На поверхности раздела жидких и твердых элементов конструкции при этом образуется так называемая *слоевая* вода. Свободная вода, осевшая на дне бака трансформатора, не влияет на снижение электрической прочности масла, но при определенных условиях может перейти в растворимое и эмульгированное состояние либо проникнуть в находящиеся вблизи изоляционные материалы, что недопустимо в эксплуатации.

Измерение влагосодержания масла осуществлялось на влагомере ВТМ-2 и титраторе Фишера фирмы Metler Tolledo согласно РД 34.43.107–95.

Результаты определения влагосодержания рапсового масла приведены в таблице 3.4.

Таблица 3.4. Влагосодержание рапсового масла, г/т

№ партии	Влагомер ВТМ-2	Титратор DL32
Партия 1	178,2	235,0
Партия 2	51,0	54,1

3.3.5. Температура вспышки в закрытом тигле. Температура вспышки в закрытом тигле – температура, при которой пары масла, нагреваемого в закрытом сосуде, образуют с воздухом смесь, вспыхивающую при поднесении к ней пламени. Температура вспышки характеризует наличие в масле летучих

веществ и зависит от упругости насыщенных паров масла. Нижний предел температуры вспышки регламентируется в основном не противопожарными соображениями, а возможностью получения масел с достаточно низкой упругостью паров, позволяющей эффективно дегазировать и осушать их [12].

Измерение температуры вспышки в закрытом тигле осуществлялось с помощью автоматического регистратора «Вспышка-А». Для данного регистратора предусмотрен режим ориентировочного ускоренного определения температуры вспышки. Этот режим был выбран для первоначального определения данного показателя для рапсового масла, т.к. мы не имели достаточно точных данных о его значении. Затем были проведены повторные измерения с установлением предварительной температуры (249 °С). Результаты оказались приемлемыми: $T_{всп} = 251$ °С и $T_{всп} = 256$ °С для первой и второй партии масел. Отметим, что они сопоставимы с данными по температуре вспышки натуральных эфиров и жидкостей, а также удовлетворяют требованиям по данному параметру, указанному в ГОСТе на рапсовое масло.

3.3.6. Содержание механических примесей. При определении содержания примесей в масле определяются количество частиц и распределение их по размерным диапазонам. Эти сведения позволяют более точно оценить степень опасности загрязнения масла. Определение класса чистоты жидкостей, а также количества частиц загрязнения и их размеров производилось на анализаторе загрязнения жидкостей АЗЖ-975.

Таблица 3.5. Класс промышленной чистоты рапсового масла

Размер частиц, мкм	2–5	5–10	10–25	25–50	50–100	>100
Проба 1 (1-я партия)	34319	4105	427	42	36	6
	Класс промышленной чистоты: 11					
Проба 2 (1-я партия)	34915	4045	478	30	25	5
	Класс промышленной чистоты: 11					
Проба 1 (2-я партия)	232098	43131	326	84	11	0
	Класс промышленной чистоты: 13					
Проба 2 (2-я партия)	227515	42092	191	16	1	0
	Класс промышленной чистоты: 13					

3.3.7. Кислотное число. Кислотное число масла – это количество миллиграммов едкого калия (КОН), необходимое для нейтрализации всех свободных кислот, содержащихся в одном грамме масла. Этот показатель свидетельствует о содержании в масле любых кислых веществ. Увеличение значения кислотного числа свидетельствует об окислении масла, которое может вызвать коррозию конструктивных элементов, образование мыл с ионами металлов, и развитие коллоидно-дисперсных процессов, ведущих к снижению электрической прочности масла. Кислоты из-за своей полярности могут также способствовать увеличению поглощения воды бумажной изоляцией.

Кислотное число рапсового масла определялось по ГОСТ 5985–79, оно выражено в мг КОН/г масла. Результаты опыта приведены в таблице 3.6.

Таблица 3.6. Кислотное число рапсового масла

№ партии исследуемого масла	№ пробы	V_{KOH} , мл	КЧ, мгКОН/г
Партия 1	1	0,32	0,041
	2	0,31	0,040
Партия 2	1	0,74	0,080
	2	0,74	0,080

3.3.8. Содержание водорастворимых кислот. Содержание водорастворимых кислот (ВРК) или реакция водной вытяжки – это количество миллиграммов едкого калия, необходимое для нейтрализации водорастворимых кислот, содержащихся в одном грамме масла. Анализ проводится для определения в масле низкомолекулярных кислот, которые являются наиболее агрессивными и вызывают коррозию металлов и старение бумажной изоляции. Их наличие свидетельствует о достаточно глубоком разложении масла. Низкомолекулярные кислоты растворяются в воде. Сущность метода заключается в извлечении водорастворимых кислот и щелочей из нефтепродуктов (в нашем случае из рапсового масла) дистиллированной водой с последующим титрованием водной вытяжки из масла. Содержание ВРК рапсового масла оказалось ниже уровня погрешности методики определения ($< 0,005$ мг КОН/г масла), а именно $0,002$ мг КОН/г масла.

3.3.9 Поверхностное натяжение на границе вода–масло. Поверхностное натяжение на границе раздела фаз трансформаторных масел с водой является интегральным показателем качества свежих, подготовленных к заливке в электрооборудование и эксплуатационных трансформаторных масел. Значение этого показателя уменьшается с ростом концентраций в масле растворенной воды, кислых и окисленных полярных продуктов старения бумажной изоляции и масла, коллоидных соединений металлов конструкционных материалов и других загрязнителей, включая возможное образование растворимого шлама и осадка. Поверхностное натяжение рапсового масла измерялось методом отрыва платинового кольца с применением автоматического тензиометра марки Sigma702ET. Значение поверхностного натяжения на границе вода–рапсовое масло составило в среднем $24,9$ мН/м.

3.3.10. Температура застывания. Температура застывания – это температура, при которой масло загустевает настолько, что при наклоне пробирки с охлажденным маслом под углом 45° его уровень останется неизменным в течение 1 мин. Свежее трансформаторное масло не должно застывать при температуре -45°C ; в южных районах страны разрешается применять масло с температурой застывания -35°C . Для эксплуатационных масел допускается ряд отступлений от нормированной температуры застывания в зависимости от того, находится ли масло в трансформаторе или выключателе, работает в закрытом помещении или же на открытом воздухе. Для специальных арктических сортов трансформаторного масла температура застывания уменьшается до -60°C , однако при этом понижается и температура вспышки до $(90-100)^\circ\text{C}$.

Сущность методов определения температуры застывания заключается в предварительном нагреве образца испытуемой жидкости с последующим охлаждением ее с заданной скоростью до температуры, при которой образец остается неподвижным. Указанную температуру принимают за температуру застывания. По данным из разных источников температура застывания рапсового масла составляет от 0 °С до -10 °С и даже до -23 °С.

3.4. СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПОЛУЧЕННЫХ ДАННЫХ ПО РАПСОВОМУ МАСЛУ С УСТАНОВЛЕННЫМИ ТРЕБОВАНИЯМИ ДЛЯ ТРАНСФОРМАТОРНЫХ МАСЕЛ И НЕИСПОЛЬЗОВАННЫХ НАТУРАЛЬНЫХ ЭФИРОВ

Для оценки приемлемости значений показателей рапсового масла в качестве жидкого диэлектрика при использовании в высоковольтном электрооборудовании был проведен сравнительный анализ полученных данных и установленных норм для этих показателей отечественного трансформаторного масла.

Свежие трансформаторные масла, а также подготовленные к заливке, после заливки в электрооборудование и эксплуатационные должны удовлетворять требованиям РД 34.45–51.300–97 «Объем и нормы испытаний электрооборудования». Требования для неиспользованных природных сложных эфиров, предназначенных к использованию в трансформаторах и подобном электрооборудовании, описаны в ИЕС 62770. Сравнительная характеристика показателей качества свежих электроизоляционных жидкостей и полученных результатов испытаний рапсового масла приведена в таблице 3.7.

Таблица 3.7. Требования к качеству электроизоляционных жидкостей и результаты исследования свойств рапсового масла

Показатель качества масла и номер стандарта на метод испытания	Предельно допустимое значение показателя качества				Фактическое значение
	Трансформаторное масло			Свежий натуральный эфир	Товарное рапсовое масло
	Свежее	Подготовленное к заливке	Эксплуатационное		
Пробивное напряжение по ГОСТ 6581–75, кВ, не менее	-	55	45	35	70–77
Кислотное число по ГОСТ 5985–79, мгКОН/г, не более	0,01–0,02	0,02	0,25	0,06	0,04–0,08

Таблица 3.7. Продолжение

Температура вспышки в закрытом тигле по ГОСТ 6356–75, ISO2719, °С, не ниже	95–135	135	125	250	256
Влагосодержание по ГОСТ 7822–75, IEC60814, г/т, не более	-	25	25–30	200	36–178
Тангенс угла диэлектрических потерь при 90 °С по ГОСТ 6581–75, IEC 60247, %, не более	0,5–2,2	2,0	10	5,0	18,9–25,4
Содержание водорастворимых кислот и щелочей по ГОСТ 6307–75 (качественно)	отсутствие	отсутствие	отсутствие	отсутствие	отсутствие
Содержание водорастворимых кислот по [98] мг КОН/г, не более	-	-	0,014	-	0,002
Класс чистоты по ГОСТ 17216–71, по ГОСТ 6307–75, содержание механических примесей	отсутствие	12 отсутствие	13	-	11/13 отсутствие
Температура застывания по ГОСТ 20287–91, ISO 3016, °С, не выше	От -45 до -60	-60 (для арктических масел)	-	Max. -10 °С	от 0 до -23 (из литературных источников)
Вязкость кинематическая, мм ² /с, ГОСТ 33–82, ISO 3104 не более при температуре: 40 °С -30 °С	3,5; 11 1200–1600	-	-	Max. 50	33
Плотность при 20 °С, по ГОСТ 3900–85, ISO 3675 или ISO 12185 кг/м ³ , не более	885–900	-	-	Max. 1000	918
Цвет на колориметре ЦНТ, единицы ЦНТ, не более	1–1,5	-	-	-	0,5
Содержание общей серы, по ГОСТ 19121–73, %, не более; - коррозионная сера, DBDS (дибензилдисульфид), IEC 62535, IEC 62697–1	0,3–0,6 - -	-	-	- коррозионная, ниже предела обнаружения	0,0006–0,0050[84] -
Мутность, МУ, Приказ РАО ЕЭС России № 497 от 07.08.2007 г., м ⁻¹	-	-	40	-	9,95–8,37
Диэлектрическая проницаемость, IEC 60247	2,2–2,4 [90]	-	2,1 (из протокола)	-	2,8

Таблица 3.7. Продолжение

Удельное объемное сопротивление, IEC 60247, Ом·м	-	-	$1,66 \times 10^{12}$ (из протокола)	-	$2,24 \times 10^9$
Показатель преломления, ГОСТ 18995.2–73	-	-	1,4685 (из протокола)	-	1,4743
Поверхностное натяжение, мН/м, СТО 56947007–29.180.03.070–201, не менее	40	-	22	-	24,9

3.5 ИЗМЕРЕНИЯ РАСТВОРИМОСТИ ГАЗОВ

Коэффициенты растворимости газов для трансформаторных масел представлены в СТО 56947007–29.180.03.094–2011. Коэффициенты определены экспериментально в ходе специально проведенных исследовательских работ. В частности, в [1] приведены результаты уточненных значений коэффициентов растворимости исследованных газов для различных современных марок трансформаторных масел в диапазоне температур 20–45 °С.

С помощью анализа растворенных газов в трансформаторах можно обнаружить различные группы дефектов, перегревы токоведущих соединений и элементов конструкции остова, электрические разряды в масле. Например, появление высоких концентраций *водорода* в трансформаторном масле может быть следствием частичных, искровых и дуговых разрядов, *ацетилен* – электрической дуги, искрения. Высокие концентрации *этилена* могут свидетельствовать о нагреве масла и бумажно-масляной изоляции выше 600 °С, а *оксида* и *диоксида углерода* – о старении и увлажнении масла и/или твердой изоляции [13].

Однако возникает вопрос, будут ли те же газы, а именно, водород, метан, этан, этилен, ацетилен, являться диагностическими для электрооборудования, заполненного рапсовым маслом? Для ответа на вопрос следует обратиться к сопоставлению составов рапсового и минерального масел. Основными компонентами минерального масла являются насыщенные циклопарафины $C_n H_{2n}$ и насыщенные парафины $C_n H_{2n+2}$ средней молекулярной массой (220–340) а.е. [12]. Как уже отмечалось выше, основными компонентами рапсового масла являются жирные кислоты (например, эруковая кислота $CH_3-(CH_2)_7-CH=CH-(CH_2)_{11}-COOH$, олеиновая $CH_3(CH_2)_7CH=CH(CH_2)_7COOH$, линолевая $CH_3(CH_2)_3-(CH_2CH=CH)_2(CH_2)_7COOH$ кислоты) в составе ацилглицеридов, в которых эти кислоты связаны с молекулами глицерина $C_3H_5(OH)_3$. Из состава видно, что оба масла имеют валовой элементный состав, близкий друг к другу, соответственно все вышеперечисленные газы будут образовываться в процессе разложения рапсового масла, и их появление будет указывать на определенные неблагоприятные процессы в маслонаполненном электрооборудовании [14].

3.5.1. Методы исследования. При проведении испытаний, в том числе при определении растворимости газов в рапсовом масле был применен *газохроматографический метод*. Анализы масла проводились на газохро-

матографическом комплексе «Кристалл 5000М» (ЗАО СКБ «Хроматэк» г. Йошкар-Ола). Хроматографический анализ растворенных в масле газов проводился в следующем режиме работы хроматографического комплекса:

- время анализа – 13 минут;
- ДТП (детектор по теплопроводности): $t^0 = + 200$ °С, расход аргона – 10 мл/мин;
- ПИД (пламенно-ионизационный детектор): $t^0 = + 200$ °С, расход водорода – 20 мл/мин, воздуха – 250 мл/мин;
- термостат колонок: $t^0 = +40$ °С, колонка 1 – расход аргона – 25 мл/мин, колонка 2 – расход аргона – 10 мл/мин;
- метанатор (устройство, преобразующее оксид и диоксид углерода в метан посредством гидрирования и дальнейшего детектирования на ПИД): $t^0 = +325$ °С.

Для проведения экспериментов была использована поверочная газовая смесь (далее ПГС) производства ООО «Мониторинг» (г. С.-Петербург).

При отборе масла и газа применялись пробоотборники с трехходовыми кранами «ELCHROM». Разные температурные режимы обеспечивались с помощью хладотермостата воздушного ХТ-3/40–1, а также специального оборудования (кондиционер, увлажнитель воздуха). Контроль значений окружающей среды (температура, влажность, атмосферное давление) осуществлялся с помощью научного прибора для контроля окружающей среды Testo 622.

При подготовке хроматографических проб масла использовался *метод равновесного извлечения газов* в изолированное от атмосферы газовое пространство. Метод заключается в извлечении инертным газом растворенных в масле газов до их равновесного распределения между жидкой (масло) и газовой фазами. Равновесное извлечение водорода, оксида углерода, диоксида углерода, метана, ацетилена, этилена, этана, кислорода и азота из масла проводят в пробоотборниках. Перед проведением процедуры выделения газов из масла пробоотборники были выдержаны в условиях лаборатории не менее двух часов.

3.5.2 Результаты. Согласно методу равновесного извлечения газов в изолированное от атмосферы газовое пространство был подготовлен образец и проведен анализ растворенных газов исходного рапсового масла и масла после циклов дегазации (таблица 3.8).

С помощью баллона, заполненного аттестованной смесью диагностических газов с известной концентрацией (ПГС), была собрана установка по насыщению дегазированного рапсового масла диагностируемыми газами. Соотношение масляной и газовой фазы также составило 1:1 по объему. Смесь газов из ПГС под давлением 9 МПа выталкивала притертый стеклянный поршень пробоотборника до необходимого объема (10 мл).

Методика определения коэффициента растворимости K_r заключалась в следующем. После добавления газовой смеси в пробоотборник начинался процесс растворения газов в масле, при этом концентрация газа в газовой части пробоотборника уменьшалась, а в масляной – увеличивалась. Считалось, что равновесие по каждому газу устанавливается независимо друг от друга.

Таблица 3.8. Сопоставление уровней концентраций растворенных газов до и после дегазации

Название компонента	Концентрации газов в исходном товарном масле	Концентрации газов после дегазации, % об.			
		Пробо-отборник 1	Пробо-отборник 2	Пробо-отборник 3	Пробо-отборник 4
H ₂	0,00142	0	0	0,00009	0,00005
CO	0,00123	0,00010	0,00031	0,00049	0,00012
CO ₂	0,01158	0,00441	0,00544	0,00720	0,00347
CH ₄	0,00011	0	0	0,00001	0
C ₂ H ₄	0,00027	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001
C ₂ H ₆	0,00146	0,00005	0,00011	0,00030	0,00016
C ₂ H ₂	0,00000	0	0	0	0
O ₂	2,30468	0,07022	0,46714	0,70218	0,0693
N ₂	14,74366	0,14073	1,80944	2,47859	0,27707

При этом содержание газа в масле можно было не определять экспериментально, а воспользоваться тем обстоятельством, что в состоянии равновесия количество газа в масле просто должно быть равным разности количества газа в исходной смеси и в надмасляном промежутке.

Таблица 3.9. Концентрации газов в пробоотборниках при +20 °C

Название компонента	Концентрации газов в градуировочной смеси	Время перемешивания, мин.			
		10	20	30	40
H ₂	0,00991	0,00927	0,00918	0,00953	0,00945
CO	0,04677	0,04167	0,04117	0,04247	0,04193
CH ₄	0,01083	0,00815	0,00800	0,00820	0,00809
C ₂ H ₄	0,00879	0,00344	0,00334	0,00346	0,0034
C ₂ H ₆	0,0047	0,00177	0,00159	0,00168	0,00158
C ₂ H ₂	0,00094	0,00023	0,00026	0,00025	0,00023
CO ₂	0,40094	0,17129	0,16735	0,1712	0,16987
O ₂	0,99648	1,18373	1,33159	0,8912	0,8584
N ₂	2,94263	3,76035	4,44444	2,79578	2,71031

Можно показать, что в пренебрежении газосодержанием в дегазированном масле Кр определяется как

$$Kp_i = \frac{A_i + B_i}{B_i}, \quad (3.3)$$

где A_i – концентрация i -газа в ПГС, aB_i – концентрация i -газа в надмасляном пространстве.

Учет газов, оставшихся после дегазации в масле, с концентрацией C_i , можно провести с помощью модификации выражения (3.3) [4]

$$Kp_i = \frac{A_i - B_i}{B_i} + \frac{C_i}{B_i}. \quad (3.4)$$

Результаты расчетов коэффициентов растворимости диагностируемых газов при комнатной температуре (близкой к +20 °С) приведены в таблице 3.10 для четырёх пробоотборников. В шестой колонке показаны значения коэффициентов растворимости, усредненные до двух значащих цифр.

Таблица 3.10. Коэффициенты растворимости газов в рапсовом масле при температуре +20 °С

Название компонента	Коэффициент растворимости				Среднее значение K_p
	пробо-отборник № 1	пробо-отборник №2	пробо-отборник № 3	пробо-отборник № 4	
H ₂	0,048677	0,079521	0,06904	0,039874	0,06
CO	0,11543	0,136021	0,12239	0,101248	0,12
CH ₄	0,33869	0,35375	0,328834	0,320732	0,34
C ₂ H ₄	1,585294	1,631737	1,555233	1,540462	1,58
C ₂ H ₆	1,974684	1,955975	1,655367	1,797619	1,85
C ₂ H ₂	3,086957	2,615385	3,086957	2,76	2,89
CO ₂	1,360276	1,395817	1,340709	1,341939	1,36
O ₂	0,160857	-	-	0,118133	0,14
N ₂	0,085717	-	-	0,052526	0,07

Подобным образом были определены коэффициенты растворимости для этих же газов при температуре +40 °С. В таблице 3.11 показаны только средние значения коэффициентов.

Таблица 3.11. Сравнение коэффициентов растворимости газов в разных видах жидких диэлектриков

Название компонента	Коэффициенты растворимости газов в жидкостях			
	Трансф. масло при +20 °С [104]	Рапсовое масло при +20 °С	Рапсовое масло при +40 °С	Мидел 7131 при +20 °С
H ₂	0,05	0,06	0,04	0,08
CO	0,12	0,12	0,10	0,10
CH ₄	0,40	0,34	0,30	0,33
C ₂ H ₄	1,75	1,58	1,34	1,61
C ₂ H ₆	2,78	1,85	1,07	1,96
C ₂ H ₂	1,20	2,89	2,00	3,27
CO ₂	1,08	1,36	1,10	1,67
O ₂	0,15	0,14	0,16	0,15
N ₂	0,09	0,07	0,05	0,08

Для сравнения были также определены данные показатели для диэлектрической жидкости – сложного синтетического эфира Мидел 7131, широко применяющегося в Европе более 30 лет. Эта жидкость находит применение в распределительных, силовых трансформаторах и другом электрооборудовании, прежде всего, благодаря своей пожаробезопасности, отсутствием токсичности и полной биоразлагаемости.

Анализ полученных данных показывает, что растворимость газов в рапсовом масле в зависимости от температуры ведет себя примерно так же, как и растворимость газов в минеральном трансформаторном масле. Более того, значения коэффициентов растворимости основных «диагностических» газов близки к аналогичным коэффициентам трансформаторного масла. Исключениями являются пониженная растворимость этана, а также повышенная растворимость ацетиленов и углекислого газа. Что касается растворимости газов в Мидел 7131, их значения близки к соответствующим значениям для рапсового масла. Близость значений коэффициентов позволяет надеяться, что диагностика высоковольтного электрооборудования, заполненного как рапсовым маслом, так и Мидел 7131, не будет принципиально отличаться от диагностики традиционного маслонаполненного электрооборудования.

3.6. СТАБИЛЬНОСТЬ ПРОТИВ ОКИСЛЕНИЯ

В настоящем пункте приводятся результаты сравнительного исследования неингибированного и ингибированного рапсового масла с добавлением разных антиоксидантов с целью подбора наиболее эффективного из них, а также рассматриваются разные методы оценки окислительной стабильности и возможность их применения к диэлектрикам на растительной основе. Испытания рапсового масла без присадки и с присадкой на физико-химические показатели выполнены на базе испытательной лаборатории Филиала АО «Электросетьсервис ЕНЭС» – СПб «Электросетьремонт» (г. Новосибирск). Эксперименты по исследованию эффективности разных присадок для рапсового масла проведены в лаборатории НИИ химии антиоксидантов Новосибирского государственного педагогического университета. Испытания рапсового масла на стабильность против окисления по методу, описанному в МЭК 1125, выполнены в испытательной лаборатории ОАО ПЭСК-1 (г. Новосибирск).

Одной из основных причин порчи растительных и минеральных масел является окислительная деструкция. Окисление представляет собой цепной свободно-радикальный процесс, который приводит к появлению в органических материалах пероксидных соединений, а на более поздних стадиях – альдегидов, кетонов, спиртов и низкомолекулярных кислот. Наиболее уязвимы в этом отношении масла, содержащие остатки моно- и полиненасыщенных жирных кислот. Перекисное окисление инициирует целый каскад неблагоприятных превращений, которые оказывают влияние на структуру, цвет, физико-химические свойства и приводят к ухудшению потребительских качеств масел.

Все производимые за рубежом растительные масла для энергетического оборудования включают в себя замедлители окисления (ингибиторы) и чаще всего используются в закрытых (герметичных) трансформаторах, исключающих контакт с воздухом.

Устойчивость изоляционных масел к окислению характеризуется таким показателем как *стабильность против окисления*.

Стабильность масла против окисления определяется кислотным числом, количеством летучих низкомолекулярных кислот и осадка, образующихся при окислении. Условия испытания (температура, время окисления, расход кислорода и катализатор) предусматриваются в нормативно-технической документации на масла различного назначения [8]. При испытании изоляционных масел на стабильность имитируется воздействие неблагоприятных факторов, имеющих место в электрооборудовании, таких как: повышенная температура, контакт с металлическими материалами, наличие воздуха. В некоторых случаях в программу испытания на стабильность добавляется фактор воздействия высокого напряжения.

Отечественный стандарт не подразумевает применение растительных масел как диэлектриков. В связи с этим стабильность определялась стандартным способом для минеральных масел, международным методом для диэлектрических жидкостей на растительной основе, а также методом, основанном на определении перекисного числа. Кроме того, проведены физико-химические испытания ингибированного и неингибированного масел.

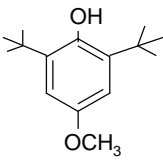
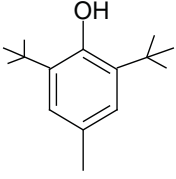
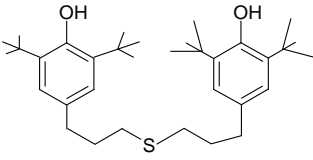
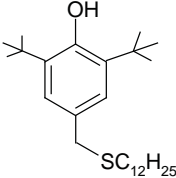
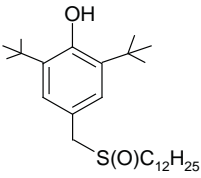
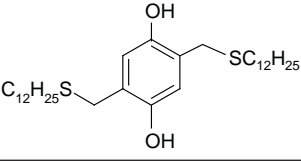
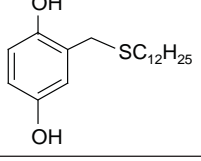
3.6.1. Определение стабильности рапсового масла стандартным методом для минеральных масел. При работе в жестких условиях (кислород 200 мл/мин при $T = 120^{\circ}\text{C}$ в течение 14 часов) в течение 2–3 часов происходит полимеризация масла – оно темнеет и становится желатиноподобным. На рисунке 3.2 представлен внешний вид данного масла до окисления и после 3 часов окисления.



Рис. 3.2. Внешний вид рапсового масла, окисленного в жестких условиях (слева) и этого же масла до окисления (справа)

3.6.2. Определение перекисного числа рапсового масла.

Таблица 3.12. Периоды индукции окисления рапсового масла с разными антиоксидантами

Наименование антиоксиданта	Период индукции, сутки	
	0,1 % массы	0,2 % массы
Контрольное масло (без добавок)	3–4	
Бутилоксианизол 	-	7
Ионол 	4–5	5
Тиофан 	-	13
Тиофан М 	16–17	43
Тиофан М (о) 	-	42
2,5-додецил- тиометил- гидрохинон 	33–34	64
2-додецил- тиометил- гидрохинон 	51	87–88

Определение перекисного числа исследуемой жидкости как способа оценки ее окислительной стабильности осуществлялось согласно методу из ГОСТ Р 51487–99.

Была проведена работа по сравнительному исследованию антиоксидантной активности группы монофункциональных и серосодержащих фенольных антиоксидантов на модели термического автоокисления рапсового масла. В качестве антиоксидантных добавок к рапсовому маслу были выбраны известные монофункциональные фенольные антиоксиданты – ионол и бутилоксианизол, а также группа серосодержащих антиоксидантов.

Окисление рапсового масла проводили при 80 °С в чашках Петри. Проба весом 25 г масла с растворенной в нем навеской антиоксиданта переносили в чашку Петри и помещали в термостат. Концентрация ингибиторов составляла 0,1 и 0,2 %. В контрольную пробу ингибитор не добавлялся. В течение эксперимента отбирали пробы масла массой 1 г и определяли концентрацию пероксидных соединений йодометрическим методом. Об антиокислительной эффективности соединений судили по величине периода индукции, который определяли как время достижения перекисного числа 0,1 ммоль ($\frac{1}{2}O$)/кг.

² Полученные значения периодов индукции окисления рапсового масла приведены в таблице 3.12.

3.6.3. Определение стабильности против окисления рапсового масла по международному стандарту МЭК 61125:1992 для диэлектрических жидкостей на растительной основе.

Работа проводилась с добавлением присадки 2-додецилтиометилгидрохинона. Поскольку аппаратура для окисления масел во многом сходна с традиционным отечественным аппаратом АСПМ, то было принято решение проводить испытание на этом приборе при следующих условиях:

- масса масла – 25 г ± 0,1 г;
- окисляющий газ – кислород (в стандарте МЭК – воздух);
- скорость подачи кислорода – 0,15 ± 0,015 л/час;
- температура: + 120 ± 0,5 °С;
- катализатор: пластинка из меди М1 (ГОСТ 859) 10 мм × 70 мм × 0,3 мм.

Продолжительность испытания составила 48 часов (4 дня по 12 часов) и выполнялась по графику: начало в 07:00 часов, окончание в 19:00.

Итоговые результаты испытания:

- летучие низкомолекулярные кислоты: 0,05 мг КОН/1 г масла;
- растворимые кислоты: 14,2 мг КОН/1 г масла;
- осадок – менее 0,002 %.

Согласно требованиям СО 34.45–51.300–97 «Объем и нормы испытаний электрооборудования» для наиболее распространенного трансформаторного масла марки ГК характеристики стабильности следующие:

- масса летучих кислот – 0,04 мгКОН/г масла;
- содержание осадка – 0,015 % массы;
- кислотное число окисленного масла – 0,10 мгКОН/г масла;
- индукционный период – 150 часов.

Из сравнения приведенных данных можно сделать вывод о том, что показатели рапсового масла удовлетворяют требованиям СО 34.45–51.300–97 «Объем и нормы испытаний электрооборудования» для наиболее распространенного трансформаторного масла марки ГК, кроме одного показателя – кислотного числа окисленного масла.

3.6.4. Физико-химические испытания ингибированного рапсового масла. Для резкого замедления окислительных процессов при эксплуатации оборудования в трансформаторное масло на стадии изготовления вводится антиокислительная присадка ионол (или агидол-1). Со временем под действием процессов окисления содержание присадки в масле снижается, что характеризует остаточный срок службы масла. При снижении концентрации ионола до критического уровня его антиокислительные свойства утрачиваются. В целях замедления процессов окисления в растительных маслах применяются разнообразные антиоксиданты, в том числе и ионол. В рамках данной работы были проведены сравнительные испытания показателей качества рапсового масла с добавками как изоляционной жидкости для высоковольтного маслонаполненного оборудования.

Для подготовки образцов была использована методика из Методических указаний по эксплуатации трансформаторных масел. Согласно ей были подготовлены образцы масла с 2-додецилтиометилгидрохиноном концентрацией 0,1 %, 0,2 % и 0,3 % масс. Для сравнительных испытаний были подготовлены и образцы с ионолом таких же концентраций.

В таблице 3.13 приведены результаты физико-химических испытаний ингибированного рапсового масла.

Таблица 3.13. Физико-химические показатели рапсового масла с добавлением антиокислительных присадок

Определяемый показатель	без присадок	с ионолом	с 2-додецилтио-метилгидрохиноном
Цвет, ед.	0,5	0,5	0,5
Показатель преломления	1,4743	1,4742	1,4742
Мутность, м ⁻¹	8,37	-	7,88
Класс промышленной чистоты	13	-	14
Влагосодержание, г/т	178,2	178,3	179,6
Кислотное число, мгКОН/г масла	0,08	-	0,09
Водорастворимые кислоты	0,0019	-	0,0015
Водорастворимые кислоты и щелочи	отсутствие		
Поверхностное натяжение	24,9	-	23,9
Плотность, г/см ³	0,916	0,915	0,914
Темп. вспышки	-	-	256

Электрические испытания рапсового масла с присадками были проведены по ГОСТ 6581–75 и МЭК 247; их результаты сведены ниже.

Таблица 3.14. Электрическая прочность и диэлектрические характеристики рапсового масла с антиокислительными присадками (0,3 %)

Объект испытаний – рапсовое масло	Показатель масла			
	Пробивное напряжение (среднее значение), кВ	Тангенс угла диэлектрических потерь при 90 °С, %	Относительная диэлектрическая проницаемость	Удельное объемное сопротивление, Ом·м
Без добавок	60,2	5	2,8	2,2×10 ⁹
С ионолом	64,8	5	2,8	2×10 ⁹
С 2-додецилтио-метил-гидро-хиноном	64,3	5,7	2,8	3×10 ⁹

Измерения показали, что пробивное напряжение рапсового масла соответствует нормам на свежее трансформаторное масло для оборудования всех классов напряжения даже при высоком уровне влагосодержания. Не выявлено существенного ухудшения физико-химических показателей масла при добавлении присадок.

Полученные данные по определению перекисного числа рапсового масла с добавлением разных антиоксидантов в разных концентрациях свидетельствуют о том, что все исследованные серосодержащие антиоксиданты по способности ингибировать окисление рапсового масла значительно превосходят монофункциональные соединения (ионол, бутиоксианизол). Наибольшие значения периодов индукции окисления были получены с 2-додецилтиометилгидрохиноном.

Проведенные эксперименты с рапсовым маслом показали, что характеристики масла могут быть доведены до технически применимых в трансформаторах.

3.7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ДИФФУЗИИ ОСНОВНЫХ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ГАЗОВ

Работа по определению коэффициентов диффузии основных диагностических газов в трансформаторном масле проводилась ранее [2]. Методика эксперимента, используемая в данной работе, идентична [2]. Однако ячейка, разработанная авторами работы [2], допускала насыщение масла воздухом в процессе заливки. В связи с этим нами была разработана новая экспериментальная ячейка, заполнение маслом которой производится при разрежении. Далее, при помощи математической модели по поставленным нами условиям и предоставленным нами данным о скорости растворения газов, определялись коэффициенты диффузии. Условия:

1) система не имеет границ. Стенки ячейки не оказывают воздействия на пузырек диагностического газа;

2) пузырек имеет сферическую форму (не деформируется за счет удержания его на сетке) и газ в нем распределен равномерно;

3) диффузия диагностического газа из пузырька в дегазированную электроизоляционную жидкость происходит равномерно, по всей площади;

4) на границе пузырька с маслом возникает равновесная концентрация газа в масле и газа в газе. Далее газ диффундирует из этой прослойки в объем масла;

5) существует движение жидкости. Так как пузырек при растворении сжимается, то диффузия происходит непосредственно в движущуюся навстречу жидкость;

6) существует обратная диффузия газов, растворенных в масле, в пузырек диагностического газа.

3.7.1. Описание экспериментальной установки. Для измерений была разработана экспериментальная ячейка (рис. 3.3) в виде вертикального цилиндра (1), с вмонтированной в стенку иглой (4), для подвода испытуемого газа. Дно (6) и крышка (2) ячейки выполнены из оргстекла, что позволяет проводить оптическую регистрацию, исключая насыщение масла воздухом. В верхней части ячейки установлена сетка (5), которая позволяет удерживать газовый пузырек в объеме жидкости, избегая упругой деформации у крышки. Через кран (7) производится подача масла в объем ячейки за счет разрежения, создаваемого вакуумным насосом, соединенным с краном (3). Подготовленная ячейка помещалась под микроскоп, на окуляр которого устанавливалась видеокамера.

Инъекция газа в ячейку производится пробоотборником *Elchrom*, который представляет собой комбинацию специального цельностеклянного шприца с поршнем индивидуальной притирки и вакуумного трехходового крана. Выход через переходную муфту подключен к игле ячейки, а второй к баллону с диагностируемым газом. Во избежание резких скачков давления в системе был использован вентиль тонкой регулировки (натекатель Н-12).

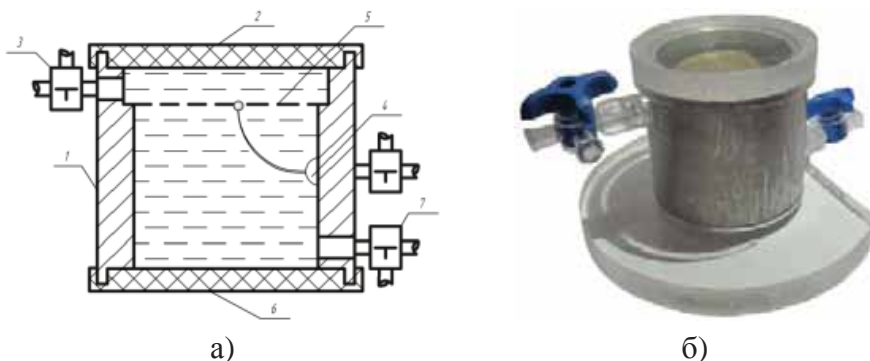


Рис. 3.3. Экспериментальная ячейка: а) – эскиз ячейки; б) – фото ячейки

3.7.2. Экспериментальные результаты по оптической регистрации растворения пузырьков диагностических газов в различных электроизоляционных жидкостях.

Ход работы по определению коэффициентов диффузии состоит из четырех основных этапов:

- 1) подготовка исследуемой жидкости (дегазация);
- 2) проведение исследования (ввод пузырька в экспериментальную ячейку и видеорегистрация);

- 3) измерение размеров;
- 4) расчет коэффициентов диффузии.

Для определения коэффициентов диффузии должно использоваться дегазированное масло. Дегазация масла проводилась следующим образом: круглодонная колба наполнялась на 1/3 своего объема заранее обезвоженной электроизоляционной жидкостью, погружался магнитный элемент мешалки, далее колба закрывалась аллонжем и устанавливалась на штатив, над магнитной мешалкой, а к отводу подключался вакуумный шланг, идущий к вакуумному насосу.

Проведение эксперимента можно представить в виде схемы (рис. 3.4), в которой присутствуют различного вида связи.

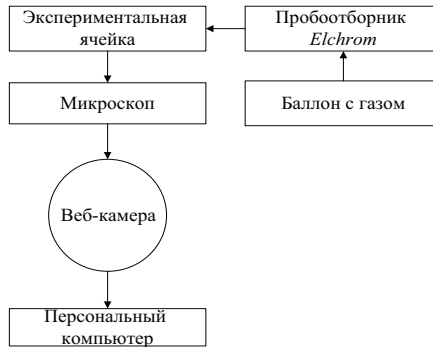


Рис. 3.4. Структурная схема экспериментальной установки

Далее при помощи вакуумного насоса, соединенного с ячейкой краном (3) создавалось разрежение внутри ячейки. Затем экспериментальная ячейка через кран (7) заполнялась дегазированным маслом. Далее при помощи шприца дозатора, в роли которого выступает пробоотборное устройство *Elchrom*, через газоподводящий тракт производилась инъекция пузырька испытуемого газа и запускалась оптическая регистрация. Полученная запись подвергалась разбиению на кадры (рис. 3.5) с заданным интервалом времени.

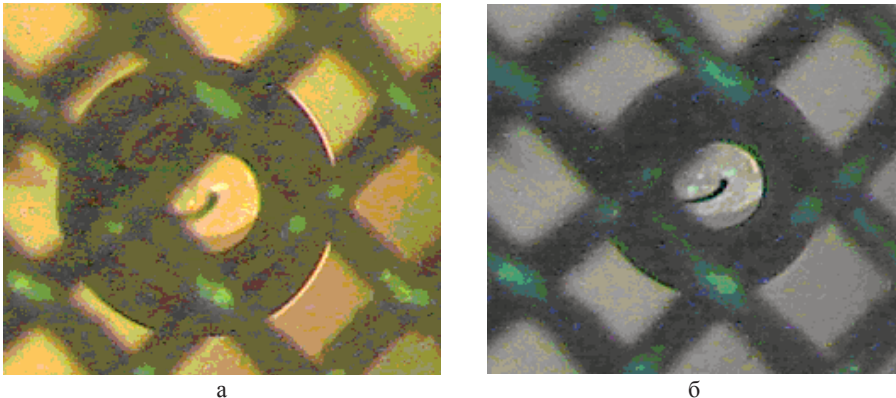


Рис. 3.5. Пузырек исследуемого газа: а) – в начальный; б) – в конечный моменты регистрации

С полученных кадров в графическом редакторе снимались размеры газовых пузырьков с течением времени, используя метод построения окружности по трем точкам. Определение масштаба проводилось путем сопоставления размеров реперного образца, с экспериментально полученными размерами пузырька. Данные о скорости растворения водорода в различных электроизоляционных жидкостях представлены на рисунке 3.6.

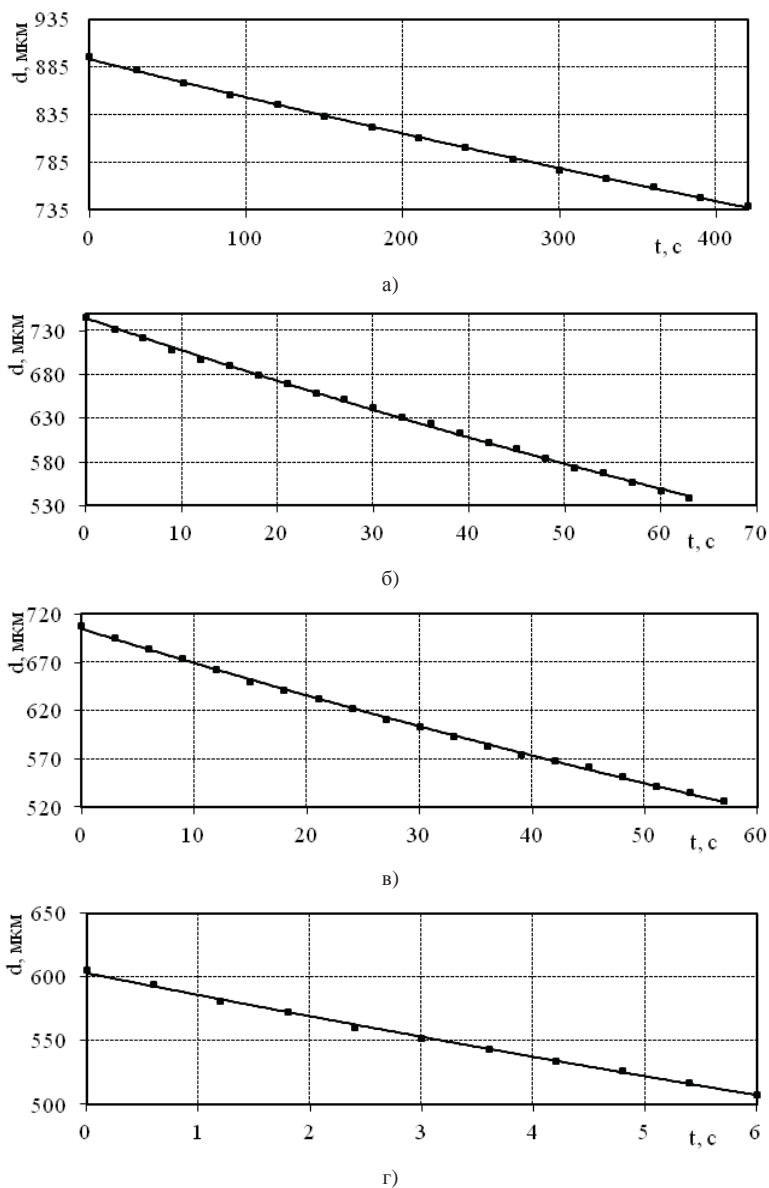


Рис. 3.6. Кривые растворения метана при 30 °С: а) – в касторовом масле; б) – в рапсовом масле; в) – в трансформаторном масле; г) – в кремнийорганической жидкости

3.7.3. Анализ полученных результатов. Необходимо отметить, что первоначальной задачей данной работы являлось определение коэффициентов диффузии основных диагностических газов для более перспективной, с точки зрения экологичности и пожаробезопасности, электроизоляционной жидкости растительного происхождения – рапсового масла.

Идея измерения состояла в сопоставлении экспериментальных данных с расчетом при подборе соответствующего коэффициента диффузии. Расчеты проводились в сферически симметричном случае (рис. 3.7.).

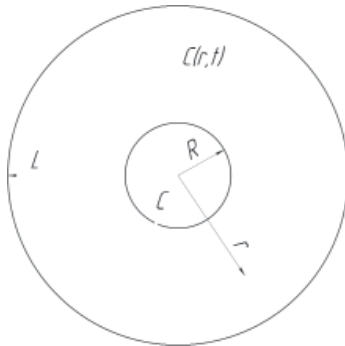


Рис. 3.7. Графическое представление модели. L: удаленная граница, R: текущий радиус пузырька, $C(r,t)$ – концентрация газа в жидкости, C и C_a : концентрации исследуемого газа и воздуха в пузырьке

Уравнение диффузии газа в жидкости

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \mathbf{c} = \nabla \cdot (D \nabla c). \quad (3.5)$$

Здесь решение должно проводиться с движущейся границей с граничными условиями:

$$\left. \frac{\partial c(r,t)}{\partial n} \right|_{r=L} = 0, \quad (3.6)$$

$$c(r,t) \Big|_{r=R(t)} = kc, \quad (3.7)$$

где $v(r,t)$ – скорость потока, k – коэффициент растворимости. Температура и давления в фазах одинаковы, капиллярным давлением пренебрегаем. Выражение (3.7) соответствует принципу детального равновесия. При растворении объем уменьшается и диффузия происходит в движущуюся жидкость.

Интегральные законы сохранения имеют вид:

$$C \cdot V(t) + 4\pi \int_{R(t)}^L C(r,t) r^2 dr = C_0 \cdot V_0 \quad (3.8)$$

$$V(t) = \frac{4\pi}{3} R^3(t) \quad V_0 = \frac{4\pi}{3} R^3(t_0)$$

– текущий и начальный объемы пузырька. Начальные условия $C = C_0$ при $r > R(t_0)$ и $C = 0$ при $r < R(t_0)$.

Решение уравнения (3.5) с вышеуказанными граничными и начальными условиями проводилось методом конечных элементов.

Эти основные уравнения были получены для случая абсолютно чистого пузырька и абсолютно чистой жидкости. Вредным мешающим веществом для жидкости или пузырька является воздух. Некоторые случаи, связанные с наличием воздуха, вычислялись численно, в то время как некоторые исследовались экспериментально. В общем, ситуация такова. Остаточная концентрация воздуха в жидкости приводит к диффузии воздуха в пузырь и замедляет процесс растворения пузырьков на последних стадиях растворения. Однако если изучаемый газ недостаточно чист и содержит некоторое количество воздуха, то это приводит к немедленному замедлению растворения даже в начале процесса растворения. Для учета этих процессов должна быть решена более общая система уравнений. В дополнение к уравнению (3.5) и граничным условиям (3.6, 3.7) мы добавляем аналогичные уравнения для воздуха: его уравнение диффузии, начальные и граничные условия, а также модифицируем уравнение сохранения массы. Здесь для качественной оценки влияния воздуха разницей в коэффициентах диффузии и растворимости кислорода и азота пренебрегаем.

Однако при сопоставлении результатов данного исследования с результатами предыдущих исследований [2] было выявлено несоответствие коэффициентов диффузии и вязкости масла. А именно, в более вязком рапсовом масле коэффициенты диффузии оказались выше, нежели в менее вязком трансформаторном. Подчеркнем, что физическая природа обоих процессов одинакова, а именно молекулярное движение.

Таблица 3.15. Сопоставление коэффициентов диффузии основных диагностических газов в масле ГК

Газ	Трансформаторное масло (результаты предшествующих исследований)	Трансформаторное масло (результаты данного исследования)
	Коэффициенты диффузии, м ² /с	Коэффициенты диффузии, м ² /с
Водород	$3.3 \cdot 10^{-9}$	$1.4 \cdot 10^{-8}$
Метан	$1 \cdot 10^{-9}$	$2.3 \cdot 10^{-9}$
Этан	$0.4 \cdot 10^{-9}$	$1.1 \cdot 10^{-9}$
Этилен	-	$1.2 \cdot 10^{-9}$

Для того, чтобы объяснить данное несоответствие, было принято решение о повторном проведении исследования коэффициентов диффузии для трансформаторного масла. Результаты которого были представлены в таблице 3.15.

Из приведенных выше данных видно, что коэффициенты диффузии, определенные по одной и той же методике для одного и того же масла, различны. Проверялись две гипотезы: наличие остаточного воздуха в масле и наличие остаточного воздуха в подаваемом пузыре в экспериментах [2]. Связано это

с тем, что дегазация масла в работе [2] производилась при помощи мембранного насоса, создающего разрежение, а не вакуум, что могло быть причиной недостаточной дегазации. Кроме того, недостаточная продувка тракта может привести к попаданию воздуха в пузырек. Наличие остаточного воздуха может привести к замедлению скорости его растворения. Поскольку коэффициент диффузии диагностического газа определяется по динамике растворения пузырька, уменьшение скорости растворения приводит к неправильному его определению, а именно, к получению заниженных значений, особенно для малорастворимых газов, например, водорода. По математической модели, в которой учитывается влияние обратной диффузии на динамику растворения пузырька, была получена зависимость коэффициента диффузии от концентрации растворенного в масле воздуха (рис. 3.8).

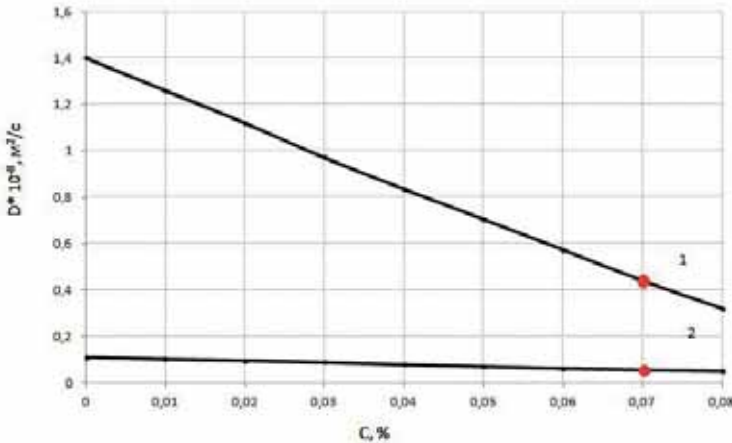


Рис. 3.8. Зависимость кажущихся коэффициентов диффузии (D) водорода (1) и этана (2) в трансформаторном масле при различных концентрациях (C) остаточного воздуха

Эти гипотезы были проверены экспериментально, а именно, путем однократной и многократной продувки тракта изучаемым газом. Оказалось, что при не очень тщательной продувке возможно получить кривые растворения пузырьков, идентичные ранее полученным данным [2].

Полученные коэффициенты диффузии можно свести в таблицу 3.16.

Таблица 3.16. Коэффициенты диффузии

	Средний коэффициент диффузии, $\text{м}^2/\text{с}$			
	H_2	CH_4	C_2H_6	C_2H_4
Рапсовое масло	10^{-8}	3×10^{-9}	1.3×10^{-9}	1.2×10^{-9}
Трансформаторное масло	1.4×10^{-8}	2.3×10^{-9}	1.1×10^{-9}	1.2×10^{-9}
Касторовое масло	7.5×10^{-9}			
Силикон ПМС-20	2.3×10^{-8}	9×10^{-9}		

Для проверки методики был проведен ряд экспериментов по определению коэффициента диффузии метана в воде. Вода была выбрана в связи с тем, что это единственная жидкость, в которой определены по классической модели

коэффициенты диффузии и коэффициенты растворимости газов [15]. В качестве эталонных были взяты коэффициенты диффузии данного газа из справочных материалов [16]. Так как температура в помещении составляла 20 °С, то и все используемые коэффициенты подбирались для данной температуры жидкости. Для определения коэффициентов диффузии метана в воде была проведена серия экспериментов по растворению пузырька газа в дегазированной жидкости. Однако из-за высокого давления паров воды мы не могли качественно дегазировать данную жидкость. Возникал эффект обратной диффузии газов, остаточные газы диффундировали в пузырек, тем самым замедляя скорость его растворения. Для определения концентрации остаточных газов, нами, после проведения эксперимента, были отобраны 2 пробы воды в пробоотборные устройства Elchrom. В специализированной диагностической лаборатории при помощи хроматографического анализа растворенных газов были определены концентрации остаточных газов в воде.

Таблица 3.17. Концентрации остаточных газов в воде

Компонент	Концентрация	Ед. измерения
Оксид углерода (CO)	0.00002353	
Диоксид углерода (CO2)	0.00145921	
Кислород (O2)	0.007338	
Азот (N2)	0.00293622	

На основе полученных данных был произведен подбор коэффициента диффузии газа в воде при помощи математического моделирования, учитывающего наличие 4 растворенных в объеме жидкости газов. Значение полученного коэффициента меньше эталонного на 13 %. На рисунке 3.9 мы видим, что кривая растворения, полученная экспериментальным методом, соответствует расчетной, при значении коэффициента диффузии метана, равного 1.3×10^{-9} м²/с.

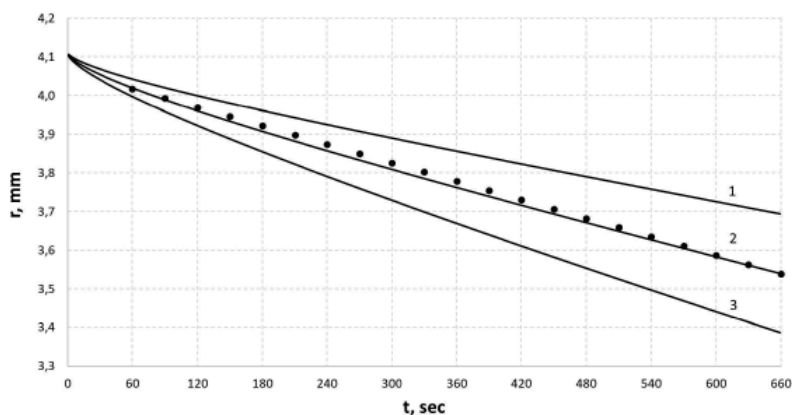


Рис. 3.9. – Кривые растворения метана в воде, полученные расчетным способом при различных значениях коэффициента диффузии: 1– 10^{-9} ; 2– 1.3×10^{-9} ; 3– 1.6×10^{-9} . Точками обозначена кривая, полученная экспериментальным методом

Литература

1. Бузаев В. В. Уточнение коэффициентов растворимости содержащихся в трансформаторном масле газов / В.В Бузаев, Л.А. Дарьян, Ю.М. Сапожников // Электрические станции. – 2006. – № 12. – С. 58–63.
2. Коробейников С.М. Растворение пузырьков диагностических газов в трансформаторном масле / С.М. Коробейников, Ю.Г. Соловейчик [и др.] // ТВТ. 2011. Т. 49, № 5. Стр. 771–776.
3. Korobeynikov S.M., Ridel A.V., Korobenkova A.Yu., Vagin D.V. Dissolution of Bubbles with Diagnostic Gases in Insulating Liquids 19th IEEE International Conference on Dielectric Liquids (ICDL), Manchester, United Kingdom, 25–29 June, 2017, 978–1-5090–4877–9/17.
4. Коробейников С.М., Аникеева М.А. Исследование растворимости газов в рапсовом масле как в электроизоляционном материале // Теплофизика высоких температур, 2016. – Т. 54, № 1. – С.108–113.
5. Аникеева М.А., Коробейников С.М. Исследование стабильности против окисления рапсового масла как диэлектрической жидкости для высоковольтного оборудования / Study of stability against oxidation of rapeseed oil // «Журнал инженерной теплофизики / Journal of Engineering Thermophysics (JET)», № 2, том V/25, 236–238, 2016.
6. Аникеева М.А. Исследование характеристик растительных масел для высоковольтного маслонаполненного электрооборудования. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, Новосибирск, НГТУ, 2016, 130 с.
7. Марков В.А. Состав и теплота сгорания биотоплив, получаемых из растительных масел / В.А. Марков, С.А. Нагорнов, С.Н. Девянин // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. – Сер. «Естественные науки». – 2012. – № 2. – С. 65–80.
8. ГОСТ 8988–2002. Масло рапсовое. Технические условия. – Москва: ИПК Издательство стандартов, 2003.
9. Методические указания по определению оптической мутности трансформаторного масла герметичных вводов 110 кВ и выше силовых трансформаторов и шунтирующих реакторов. – Москва: РАО ЕЭС России. – Приказ РАО ЕЭС России № 497 от 07.08.2007. – 16 с.
10. Коробейников С.М. Электрофизические процессы в газообразных, жидких и твердых диэлектриках. Процессы в жидкостях. Учебное пособие. – Новосибирск: НГТУ. – 203. – 126 с.
11. Колушев Д.Н. Непрерывный контроль качества трансформаторного масла / Д.Н. Колушев, А.В. Широков, И.Л. Ротберт // НРЭ. – 2011. – № 1. – С. 29–37.
12. Липштейн, Р.А. Трансформаторное масло / Р.А. Липштейн, М.И. Шахнович. – 3-е изд. – Москва: Энергоатомиздат. – 1983. – 296 с.
13. СО 153–34.0–46.302–00. Методические указания по диагностике развивающихся дефектов трансформаторного оборудования по результатам хроматографического анализа газов, растворенных в масле. – Москва: РАО «ЕЭС России». – 41 с.
14. Аникеева М.А., Коробейников С.М. Исследование свойств рапсового масла как электроизоляционного материала // Сборник докладов XI между-

народной научной конференции «Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики» МРЕЕ, С.-Петербург, ИД «Петроградский», 2015. С. 183–187.

15. *Kaye G. W. C.* Tables of physical and chemical constants and some mathematical functions. Longman, 1973. pp. 187.

16. *Cussler E. L.* Diffusion: Mass Transfer in Fluid Systems. New York: Cambridge University Press, 2009. pp. 127.

ГЛАВА 4. ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА

Представлены расчетно-теоретические исследования термодинамических свойств продуктов разложения трансформаторного масла (ТМ), и PVT-зависимости в области высоких температур, необходимые для расчета процессов стационарного теплообмена в трансформаторах, а также горения и взрыва.

4.1 УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА

Введение

Ранее в ОИВТ РАН были проведены расчетно-теоретические исследования [1, 2] термодинамических свойств реагирующей смеси, образованной при высокой температуре продуктами разложения трансформаторного масла (ТМ), и PVT-зависимости жидкой фазы в ограниченной области температур от комнатных до примерно 100 °С. Эти результаты обобщены в данной работе с целью построения уравнения состояния (УС) для всей области параметров, необходимых для расчета процессов взрыва.

Физические свойства системы резко меняются при переходе между различными областями параметров. При температурах от 0 примерно до 300 °С ТМ представляет собой типичный нефтепродукт, то есть жидкую смесь большого числа углеводородов (УВ). Именно для этой области параметров имеется некоторое количество данных, позволяющих провести оценки основных теплофизических свойств [3–5]. Теплофизические данные приводятся только для нормального давления жидкости, часто без указания марки масла и температуры. Как следствие, они не могут быть использованы для термодинамического анализа, тем более для построения УС, определяемого термическими свойствами жидкости или газа при достаточно высоких давлениях. Тем не менее, накопленный в литературе опыт прогнозирования свойств нефтепродуктов позволяет восстановить недостающие данные, в частности PVT-зависимость газовой и жидкой фаз [6–10]. В качестве исходных при таких расчетах, как правило, используются сведения по кривой разгонки, определяющей температуры кипения и весовые доли отдельных фракций. Как альтернатива могут использоваться доступные сведения по кривой упругости и плотности жидкой фазы. Особую ценность представляют ограниченные данные по сжимаемости, имеющие прямую связь с УС [11, 12].

Вне зависимости от объема и характера используемых данных, прогнозирование термодинамических свойств базируется на представлении о смеси как некотором гипотетическом веществе с усредненными по составу параметрами. Применительно к нефтепродуктам достаточно знать относительные доли парафинов, нафтенов и ароматических УВ и характерные значения молекулярной массы типичных представителей каждой группы.

Ключевую роль в схеме расчета играет оценка эффективных критических постоянных (температуры, давления и плотности), что позволяет восстановить все термодинамические свойства на основе теории соответственных состояний (ТСС).

Указанные процедуры давно разработаны и применяются для теплотехнических расчетов в нефтехимии, которые ограничены температурой примерно до 1000 К и малыми давлениями. В то же время, расчет взрывных процессов требует резкого расширения указанного диапазона с необходимостью учесть деструкцию (разложение) исходной смеси УВ. При температурах свыше $(2\div 3)\times 10^3$ К оправдано другое приближение, когда система рассматривается как идеально-газовая реагирующая смесь, включающая небольшое число компонентов: H_2 , CH_4 , C_2H_2 , C_2H_4 и ряд полиароматических соединений. По достижении температур порядка 10^4 К происходит диссоциация молекул, и в системе остаются атомы Н и С, их ионы и электроны. Идеально-газовое УС тривиально записывается лишь для мольного объема ($pV = RT$), в то время как для удельного объема ν УС имеет вид

$$p\nu = \frac{RT}{\sum_i x_i \mu_i} \quad (4.1)$$

где фигурирует средняя молекулярная масса газовой смеси

$$\bar{\mu} = \bar{\mu}(T, p) = \sum_i x_i \mu_i \quad (4.2)$$

существенно меняющаяся с изменением температуры и давления. В общем случае расчет состава требует использования специальных программных средств, так что УС (4.1) не имеет явной аналитической формы, что затрудняет его использование при итерационных расчетах газодинамического процесса. Преодолеть эту проблему удалось, построив простую аппроксимацию, которая хорошо воспроизводит плавное изменение молекулярной массы с изменением температуры.

Наиболее трудной оказалась разработка УС в промежуточной области температур, примерно между 1000 и 2000 К. В этой области процесс распада кинетически заторможен, но еще проявляется физическая неидеальность, нарушающая вид УС (4.1). Учет кинетических факторов требует большого объема физико-химических данных и существенно выводит за рамки решения поставленной задачи. В отчете предложена приближенная методика, позволяющая оценить вариации состава на основе гипотезы об условной (единственной) реакции распада тяжелых УВ, что, по-видимому, оправдано при быстро протекающих газодинамических процессах.

Еще одна из физических проблем связана с возможной ролью кулоновского взаимодействия при температурах, приближающихся к 20 000 К, где в составе доминируют заряженные частицы. Оценки показали, однако, что заметной их роль может оказаться лишь при крайних значениях параметров, 20 000 К и 100 бар. Однако, и в этих условиях кулоновское взаимодействие снижает оценку давления всего на 5 %.

Под термином УС в данной работе понимается не только традиционная для теплофизики PVT -зависимость (термическое УС), но и необходимое в газодинамике калорическое УС, то есть зависимость энергии от объема (плотности) и температуры. Эта зависимость включает два независимых слагаемых: опорную величину, соответствующую идеальному газу, и приращение вдоль изотермы, строго определяемое через термическое УС.

Детально все физические модели рассмотрены в разделе 4.1. В разделе 4.2 приведены исходные данные по составу и физическим свойствам типового ТМ, использованные при определении параметров УС. При изменении некоторых данных, приведенных в разделе 4.2 по составу и свойствам ТМ, может быть проведена новая параметризация по правилам, изложенным в разделе 2. В разделе 4.3 описаны в деталях процедуры расчета с использованием термического УС при задании в качестве исходных данных температуры и давления или температуры и плотности. Последний раздел 4.4. содержит описание калорического УС и правил его использования.

4.1. ФИЗИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И ПРИНЦИПЫ.

4.1.1. Теория соответственных состояний (ТСС). Основной принцип термодинамических расчетов нефтепродуктов состоит в использовании ТСС как надежной основы прогнозирования. Многокомпонентный состав смеси в отсутствие специфических взаимодействий (типа ассоциации) означает, что смесь близка к идеальному раствору и ее можно моделировать, как гипотетическое вещество с усредненными по составу критическими параметрами. В соответствии с ТСС, УС может быть представлено в виде

$$Z = Z(T_r, V_r, a) \quad (4.3)$$

где $Z = pV/RT$ фактор сжимаемости, p , V , T – давление, мольный объем и температура; в правой части (4.3) фигурируют приведенные параметры состояния $T_r = T/T_c$, $V_r = Vp_c/RT$. Для применения ТСС в качестве исходных данных необходимы значения критических постоянных (температуры T_c и давления p_c), а также некоторый безразмерный фактор a , учитывающий индивидуальность вещества в пределах того семейства, к которому применима эта теория. Функциональные зависимости типа (4.3) получили название трехпараметрических корреляций ТСС [13–16].

Для практических целей УС (4.3) удобно записывать в форме

$$p = \frac{RT\rho}{\mu} Z(T_r, V_r, a) \quad (4.4)$$

которая позволяет использовать плотность ρ в кг/дм^3 . В пределе малых давлений или высоких температур фактор сжимаемости $Z(T_r, V_r, a) \cong 1$, так что

$$p = \frac{RT\rho}{\mu} \quad (4.5)$$

После того, как на основе ТСС построено УС, должны быть предложены процедуры, позволяющие оценить параметры модели, используя доступные опытные данные.

В данной работе использованы процедуры, включенные в одну из версий ТСС, разработанной Л.П. Филипповым [15]. Как и другие версии ТСС [13, 14, 16], она включает различные трехпараметрические корреляции для УС, кривой упругости, калорических свойств, но обладает рядом преимуществ, важных для решения поставленной здесь задачи: (1) апробированность в задачах прогнозирования свойств тяжелых УВ, высокомолекулярных соединений и нефтепродуктов; (2) возможность прогноза на основе далеких экстраполяций по температуре.

Последнее обстоятельство позволяет обойтись без опытных данных по критическим постоянным, которые, как правило, отсутствуют для веществ с большой молекулярной массой. Вместо этого, за основу принимаются доступные данные по давлению пара и плотности жидкой фазы при комнатных температурах. Алгоритмы, предложенные в [15], позволяют восстановить весь комплекс термодинамических и транспортных свойств, располагая только 2–3 точками, где известно давление пара и плотность жидкости.

В данной работе оценки проводятся на основе далекой экстраполяции данных в 4 точках: два значения упругости пара и два значения плотности жидкой фазы. Для экстраполяции данных по давлению пара используется предложенное в [15] соотношение

$$\lg \frac{P^*}{P} = 3.9726 \lg \frac{T^*}{T} + \left(\frac{T^*}{T} - 1 \right) \left(0.3252 + 0.40529 \frac{T^*}{T} \right) \quad (4.6)$$

которое охватывает интервал по давлению пара в 5–6 порядков, то есть гарантированно перекрывает интервал от комнатной до критической температуры, которая для тяжелых УВ, составляющих основу ТМ, достигает примерно 700–800 К. Располагая двумя опытными точками по давлению пара, можно оценить масштабные параметры T^* , P^* , после чего рассчитать упругость пара в любой температурной точке.

Аналогичная корреляция в теории [15] предложена для обработки и экстраполяции данных по плотности жидкой фазы

$$\frac{\rho}{\rho_x} \left(\frac{T}{T_x} \right)^{1/2} = 1 - \left(0.885 + 1.256 \frac{\rho}{\rho_x} \right) \left(1 - \frac{\rho}{\rho_x} \right)^2 \quad (4.7)$$

Всего две опытные точки по плотности (желательно вблизи комнатных температур) позволяют определить масштабные параметры T_x , ρ_x , и рассчитать плотность при любой температуре, включая критическую.

В данной работе экстраполяция проведена с использованием данных в 4 температурных точках: двух точках, где известно давление насыщенного пара, и двух точках, где известна плотность жидкой фазы. По опытным данным определяются масштабные параметры T^* , P^* для кривой упругости

(4.6) и T_x, ρ_x для уравнения (4.7). Приняв априорное значение критической температуры T_c по любой из приближенных методик, можно получить из этих уравнений значения p_c и ρ_c .

С другой стороны, для УВ в данной работе принято кубическое УС типа уравнения Ван-дер-Ваальса (раздел 4.1.2), которое дает вполне определенное значение критического фактора сжимаемости $Z_c = p_c V_c / RT_c = 1/3$ [13–16]. Тогда варьируя значение T_c можно добиться согласия двух значений критического давления: p_{c1} , рассчитанного по уравнению (4.6), и $p_{c2} = \rho_c RT_c Z_c$, где ρ_c рассчитанная по уравнению (4.7) критическая плотность. Предложенный в работе метод экстраполяции дает по небольшому числу низкотемпературных данных весь набор критических постоянных, а также опорные соотношения для линии равновесия жидкость-пар, использованные при построении УС.

4.1.2. Уравнение состояния газовой фазы. В соответствии с ТСС, в данной задаче используется обобщенное УС, записанное в терминах приведенных параметров состояния. Постановка задачи, учитывающая приближенный характер расчетов, отсутствие опытных РVT-данных, требование простоты используемых в газодинамике выражений, накладывает серьезные ограничения на выбор подходящей формы УС из множества, предложенных в литературе. В качестве подходящего варианта для газовой фазы здесь выбрано кубическое УС

$$p = \frac{RT}{V-b} - \frac{a}{V(V+b)} \quad (4.8)$$

известное как уравнение Redlich-Kwong-Soave, близкое по форме к уравнению Ван-дер-Ваальса.

В литературе неоднократно отмечались преимущества этого типа в сравнении, как с уравнением Ван-дер-Ваальса, так и с УС более сложных форм [13, 16]. Из условий в критической точке определяются константы УС

$$a = 0.42748 \frac{(RT_c)^2}{p_c}, b = 0.08664 \frac{RT_c}{p_c} \quad (4.9)$$

что позволяет записать кубическое УС в приведенной форме

$$p_r = \frac{T_r}{V_r - b^*} - \frac{a^*}{V_r(V_r + b^*)} \quad (4.10)$$

где $V_r = \frac{V p_c}{RT_c}$, $a^* = 0.42748$, $b^* = 0.08664$. Следуя правилу (4.4), в УС

можно использовать также естественные единицы измерения

$$p = \frac{RT\rho}{\mu} \times \left[\frac{1}{1 - b^* \rho_r} - \frac{a^* \rho_r}{T_r (1 + b^* \rho_r)} \right] \quad (4.11)$$

В этом соотношении для газовой постоянной следует принять значение $R = 83.14$, если плотность измеряется в кг/дм³, давление в барах, температура в К, молекулярная масса в г/моль; выражение в квадратных скобках включает только безразмерные факторы.

Кубическое УС может применяться в достаточно широкой окрестности критической точки, пока выполняется условие $V > b$ или $b^* \rho_r < 1$. При температуре, заметно меньшей, чем критическая, давление газовой фазы ограничено сверху давлением насыщения, так что параметр $b^* \rho_r \ll 1$. В этом случае можно ограничиться разложением по плотности, что дает соотношение

$$Z = 1 + \left(b^* - \frac{a^*}{T_r} \right) \rho_r \quad (4.12)$$

или

$$V_r = \frac{T_r}{p_r} + \left(b^* - \frac{a^*}{T_r} \right) \quad (4.13)$$

которое дает явную зависимость плотности от давления.

Обобщение на смеси. При температуре свыше критической приходится учитывать частичное или полное разложение исходного УВ. Подробнее вопрос о расчетах состава рассмотрен в разделах 4.1.4 и 4.1.5. Здесь в предположении, что состав смеси известен, дана оценка констант УС. Для этой цели достаточно учесть наличие четырех компонентов: тяжелого УВ, представляющего ТМ, двух соединений с низким молекулярным весом (H_2 и CH_4) и тяжелое полиароматическое соединение $C_{32}H_{14}$. Именно эти соединения, как показано в разделе 4.1.4, доминируют в продуктах разложения ТМ при температурах примерно до 1500 К. Исходя из этого, константы УС смеси a_m , b_m определяются по правилу

$$\sqrt{a_m} = \sum_i x_i \sqrt{a_i}, \quad b_m = \sum_i x_i b_i \quad (4.14)$$

где суммирование охватывает 4 компонента: исходный УВ (1), CH_4 (2), H_2 (3), $C_{32}H_{14}$ (4). Используя связь констант УС с критическими постоянными (4.9), можно выписать соотношения

$$\sqrt{a_m} = x_1 \sqrt{a_1} + \sum_{i \geq 2} x_i \frac{T_{c,i}}{T_{c,1}} \sqrt{\frac{p_{c,1}}{p_{c,i}}}, \quad (4.15)$$

$$b_m = x_1 b_1 + \sum_{i \geq 2} x_i \frac{T_{c,i}}{T_{c,1}} \frac{p_{c,1}}{p_{c,i}}$$

в которых выделен вклад от первого компонента, исходного УВ. Его критическая температура близка к 800 К, а давление к 14 барам. Для CH_4 и H_2 критическая температура заметно ниже, а критическое давление заметно выше, что оправдывает возможность пренебречь вкладом от компонентов с номерами 2 и 3 (CH_4 и H_2). Что касается полиароматического соединения, его критические постоянные близки к параметрам исходного УВ, однако, мольная доля не превосходит нескольких процентов. В итоге, для параметров УС смеси можно использовать приближение

$$a_m = x_1^2 a_1, \quad b_m = x_1 b_1 \quad (4.16)$$

Как следствие, неидеальность смеси снижается по мере разложения исходного УВ. При температурах порядка 1500÷1600 К оцененный таким образом вклад от неидеальности «сходит на нет». В этой области состав системы усложняется за счет появления новых компонентов, но само снижение плотности за счет роста температур позволяет вести расчет для идеально-газовой смеси, следуя соотношению (4.1), то есть, учитывая только изменчивость молекулярной массы.

В промежуточной области температур, где одновременно учитывается разложение УВ и физическая неидеальность, соотношение (4.11) с учетом (4.16) принимает вид

$$p = \frac{RT\rho}{\bar{\mu}} \times \left[\frac{1}{1 - x_1 b^* \rho_r} - \frac{x_1^2 a^* \rho_r}{T_r (1 + x_1 b^* \rho_r)} \right], \quad (4.17)$$

где средняя молекулярная масса $\bar{\mu} = \bar{\mu}(T, p) = \sum_i x_i \mu_i$.

4.1.3. Уравнение состояния жидкого ТМ. Следуя предыдущей работе [2], для жидкой фазы принимается УС Тейта в виде

$$v(T, p) = v_s(T) \times \left[1 - A \ln \frac{B(T) + p}{B(T) + p_s} \right], \quad (4.18)$$

которое дает зависимость удельного объема от температуры и давления p при условии, что зависимость $v_s(T)$ известна на линии насыщения. Особенности УС: явная зависимость объема или плотности от давления, естественное согласование с линией равновесия жидкость-пар, надежное воспроизведение основного термического свойства жидкости, слабой сжимаемости. В частности, при сжатии ТМ до 100 Бар его объем или плотность меняются всего на 0.3–0.6 % [11, 12].

Для построения УС (4.18) используются данные на линии насыщения, определяемые уравнениями (4.6), (4.7) для давления пара и плотности, а также сведения по сжимаемости ТМ из работ [11, 12], где проводились измерения в узком интервале температур (от 20 до 80 °С), но при давлении до 5000 бар. При низкой температуре сжимаемость ТМ

$$\kappa = -\frac{1}{\nu} \times \left(\frac{\partial \nu}{\partial p} \right)_T \approx (4 \div 6) \times 10^{-5} \text{ Bar}^{-1}, \quad (4.19)$$

что позволяет использовать в УС линейное разложение по давлению

$$\nu(T, p) = \nu_s(T) \times \left[1 - A \frac{p - p_s}{B(T) + p_s} \right], \quad (4.20)$$

откуда видно, что сжимаемость

$$\kappa = \frac{A}{B(T) + p_s} \quad (4.21)$$

остаётся постоянной в некотором интервале давлений, во всяком случае, вплоть до 100 Bar. По мере приближения к критической температуре сжимаемость заметно возрастает, что требует использовать исходную формулу УС (4.18).

Чтобы определить константу A и температурную функцию $B(T)$, в работе используются опытные данные в трех температурных точках. Для двух точек при низких температурах $t_1 = 20^\circ\text{C}$ и $t_2 = 80^\circ\text{C}$ использованы опытные значения сжимаемости, что дает величины $A/B(T_1)$ и $A/B(T_2)$. В качестве третьей точки использована точка на критической изотерме при максимальном давлении $p = 100 \text{ Bar}$. Объем в этой точке может быть определен из УС газовой фазы, что обеспечивает «стыковку» данных для обеих фаз.

Посредством УС (4.11) вычисляется значение приведенного $V_r = \frac{V p_c}{RT_c}$, соответствующего параметрам состояния $T_r = 1$ и $p_r = 100/p_c$. На критической изотерме отношение

$$\frac{\nu(T, p)}{\nu_s(T)} = \frac{\nu(T, p)}{\nu_c} = \frac{RT_c}{p_c V_c} \times V_r = \frac{V_r}{Z_c}. \quad (4.22)$$

Принятая форма УС для газовой фазы дает точное значение критического фактора сжимаемости $Z_c = 1/3$, исключая возможность вариации этого параметра. Поэтому в той точке, где проводится согласование данных для обеих фаз, должно выполняться условие

$$1 - A \ln \frac{B(T_c) + p_{\max}}{B(T_c) + p_s} = 3V_r(\text{gas}). \quad (4.23)$$

Согласование данных по сжимаемости при низкой температуре и на критической изотерме предполагает, что функция $B(T)$ снижается с ростом температуры на несколько порядков. Данные удается воспроизвести с помощью функции вида

$$B(T) = b_0 \exp(-\alpha T_r^3) + b_1. \quad (4.24)$$

Использованная процедура дает значения плотной жидкости при крайне ограниченном объеме опытных данных. Согласование на критической изо-терме дает правильные значения объема при критическом давлении (порядка 14 бар) и при максимальном давлении 100 бар. Это обеспечивает удовлетвори-тельную точность согласования вдоль всей изотермы. Найденные значения параметров, определяющих УС (4.18): $A=1.067$, $b_0=5.87 \times 10^5$, $\alpha = 13.738$ при заданном значении $b_1=100.0$. Процедура работы с УС описана в разделе 4.3.

4.1.4. УС продуктов распада. Промежуточная область температур.

При температурах, превышающих критическую и, тем более 1000–1200 К, исходная смесь тяжелых УВ переходит в реагирующую газовую смесь; ее состав включает, в основном, H_2 , CH_4 и тяжелое полиароматическое соеди-нение $C_{32}H_{14}$, наряду с исходным УВ. Как следствие, это приводит к по-степенному снижению Ван-дер-Ваальсовского взаимодействия, поскольку для смеси исходного УВ и продуктов его распада снижаются по величине константы УС (подраздел «Обобщение на смеси» в разделе 4.1.2). В этом случае для определения УС необходимы данные по составу. При достаточно высокой температуре состав смеси, причем с большим, чем указано выше числом компонентов, рассчитан в предыдущем отчете [1]. Подобный рас-чет, однако, едва ли применим в промежуточной области, где существенную роль играет кинетика пиролиза УВ [17]. Анализ подобных процессов связан с учетом большого числа факторов, включая кинетику элементарных стад-ий радикальных реакций, скорость изменения внешних параметров и др., что существенно выводит за рамки решения поставленной задачи.

В качестве альтернативы здесь принят феноменологический подход, ис-пользующий представление о единственной условной реакции разложения УВ. Если принять в качестве формулы тяжелого УВ, образующего основу ТМ, $C_{23.69}H_{44.65}$, то с учетом данных по равновесному составу можно принять реакцию распада



Степень превращения определяют параметром, известным как коорди-ната реакции ξ ; тогда изменение числа молей каждого из компонентов ре-акции $\delta n_i = \nu_i \delta \xi$, где ν_i – стехиометрические коэффициенты. Значение $\xi = 1$ отвечает условиям полного разложения УВ, значение $\xi = 0$ – полной затор-можности реакции.

При произвольном значении ξ числа молей компонентов составляют

$$n_1 = 1 - \xi, n_2 = 0.97\xi, n_3 = 15.415\xi, n_4 = 0.71\xi \quad (4.26)$$

где номера с 1 по 4 закреплены за исходным УВ, CH_4 , H_2 , $C_{32}H_{14}$. Соответ-ственно мольные доли компонентов составляют

$$x_1 = \frac{1 - \xi}{1 + 16.095\xi}, x_2 = \frac{0.97\xi}{1 + 16.095\xi}, x_3 = \frac{15.415\xi}{1 + 16.095\xi}, x_4 = \frac{0.71\xi}{1 + 16.095\xi} \quad (4.27)$$

Решение кинетической задачи позволило бы определить временной ход $\xi(t)$. Не располагая таким решением, можно исходить из элементарной картины, в которой при быстром протекании газодинамического процесса распад УВ заторможен, пока температура не достигает некоторой границы T_0 . Примем, что при $T = T_0$ степень превращения (координата реакции) достигает 0.5, а полное превращение происходит при $T = T_0 + \Delta T$, где ΔT полуширина области, в пределах которой начинается и завершается процесс распада. Тогда при температуре $T = T_0 - \Delta T$ реакция должна рассматриваться как еще заторможенная, то есть $\xi = 0$. Тем самым, кинетика описывается температурной зависимостью $\xi(T)$, что требует конкретизировать всего два параметра T_0 и ΔT . Воспроизвести предложенную картину удастся посредством простой формулы

$$\xi(T) = 0.5[1 + \text{th}(x)] \quad (4.28)$$

где $x = \alpha(T - T_0)$. В качестве температурной границы принято значение $T_0 = 1600$ К, а значение параметра $\alpha = 0.02$ обеспечивает полуширину этой области $\Delta T = 100$ К. Тогда распад УВ начинается при 1500 К и завершается при 1700 К. При больших температурах можно считать выполненным условие химического равновесия и определять состав, включая большее число компонентов и реакций. Граница $T_0 = 1600$ К принята здесь по одному из критериев, а именно максимуму выхода полиароматического соединения, что должно заменять интенсивное образование графита. В отношении последнего принято аналогичное предположение о заторможенности фазообразования при быстропотекающем взрывном процессе. Именно это соответствует условиям эксперимента и обеспечивает плавное снижение молекулярной массы с ростом температуры. Принятая картина носит приближенный характер и может быть уточнена при детальном изучении кинетики распада УВ. По-видимому, это уточнение позволит дать более достоверную оценку характеру зависимости $\xi(T)$.

В соответствии со сделанными приближениями, определяется состав по формулам (4.27), где мольные доли зависят от координаты реакции, вычисляемой по заданной температуре, согласно (4.28). По вычисленному составу определяется средняя молекулярная масса

$$\bar{\mu} = \bar{\mu}(T, p) = \sum_i x_i \mu_i \quad (4.29)$$

и константы УС (4.16). С учетом данных по составу

$$a_m^* = \left[\frac{1 - \xi}{1 + 16.095\xi} \right]^2 \times 0.42748, b_m^* = \left[\frac{1 - \xi}{1 + 16.095\xi} \right] \times 0.08664 \quad (4.30)$$

после чего может использоваться УС в форме (4.17). Порядок вычислений с УС смеси обсуждается в разделе 4.3.4.

4.1.5. УС продуктов распада. Условия химического равновесия. Как видно из предыдущего анализа, при температуре, превышающей 1700 К, гарантированно выполняются условия химического равновесия. С другой

стороны, приближение (4.16) означает, что здесь можно игнорировать Ван-дер-Ваальсово взаимодействие, поскольку $x_1 \rightarrow 0$. Это позволяет записать УС идеального газа, но для реагирующей смеси с учетом переменного состава

$$p = \frac{RT\rho}{\mu} \quad (4.31)$$

где $R=83.14$, давление измеряется в барах, плотность в кг/дм^3 . Средняя молекулярная масса определяется по формуле (4.29), в то время как состав вычисляется по специальной программе расчета равновесия при выбранной номенклатуре соединений и заданных для расчета термодинамических функций. Подробно эти вопросы обсуждаются в отчете [1].

Однако, при построении УС, используемого в газодинамических расчетах, привлечение на каждом шаге программы расчета равновесия неэффективно с точки зрения расхода компьютерного времени. Оказалось, что температурная зависимость носит достаточно плавный характер, обеспечивая в этой области снижение молекулярной массы от 23 до 3 при максимальной температуре. При этом влияние давления в указанном интервале оказалось незначительным, что позволило использовать аппроксимацию вида

$$\bar{\mu} = 4913.99 \times T^{-\nu}, \nu = 0.72109 \quad (4.32)$$

4.1.6. Вклад в УС за счет неидеальности плазмы. При достаточно высокой температуре имеет место почти полная ионизация основных компонентов смеси, атомов углерода и водорода, что делает необходимым оценить возможный вклад от неидеальности плазмы. Оценка сделана в дебаевском приближении, когда радиус экранирования превосходит среднее расстояние между частицами. Следуя [18], запишем УС ионизованного газа в виде

$$p = nk_B T - \frac{e^3}{3} \left(\sum n_i z_i^2 \right)^{3/2} \sqrt{\frac{\pi}{k_B T}} \quad (4.33)$$

Здесь k_B постоянная Больцмана, n число всех частиц в единице объема, n_i число ионизованных частиц с зарядом z_i , e заряд электрона.

При оценках в интервале температур $(1 \div 2) \times 10^4$ К, примем, что доля нейтральных частиц мала, и в системе находятся только электроны и однократно ионизованные ионы. Тогда УС (4.33) удобно переписать в форме

$$p = nk_B T [1 - \Delta] \quad (4.34)$$

$$\Delta = \frac{\sqrt{\pi}}{3} \left(\frac{e^2 n^{1/3}}{k_B T} \right)^{3/2} \quad (4.35)$$

Таким образом, относительный вклад неидеальности в УС определяется безразмерным фактором, зависящим от отношения энергии взаимодействия

зарядов на расстоянии $n^{-1/3}$ (среднее расстояние между частицами) к тепловой энергии.

Проведем оценку при максимальных значениях температуры и давления, то есть, 20 000 К и 100 бар. В системе единиц СГС параметр

$$\frac{e^2 n^{1/3}}{k_B T} = \frac{(4.8 \times 10^{-10})^2 \times (3.7 \times 10^{19})^{1/3}}{1.38 \times 10^{-16} \times 2 \times 10^4} \approx 0.27 \quad (4.36)$$

так что $\Delta = \frac{\sqrt{\pi}}{3} \times 0.27^{3/2} \approx 0.083$, то есть поправка составляет 8 %. Однако, доля ионизованных частиц при давлении 100 бар составляет 0.4, что снижает эту оценку до 5 %. С другой стороны, при давлении 1 бар, когда имеет место полная ионизация, параметр снижается за счет уменьшения полного числа частиц, что дает величину 1.7 %. Таким образом, при температуре 2×10^4 К поправочный фактор изменяется в интервале не более 2÷5 %.

При температуре в 10^4 К степень ионизации меняется от 0.1 при 1 баре до 0.01 при 100 барах. Легко видеть из формулы (4.35), что снижение степени ионизации заметно перекрывает возможный рост фактора за счет снижения температуры. Окончательный вывод из проведенных оценок состоит в том, что относительная поправка за счет неидеальности плазмы может достигать только 5 %, причем эта цифра реализуется лишь в одном из углов по параметрам, а именно при 2×10^4 К и давлении 100 бар.

4.2. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ.

При построении УС использовался определенный объем данных по составу и физическим свойствам ТМ. Прежде всего, были использованы результаты фракционно-группового анализа [19], который позволяет выявить осредненные характеристики по углеводородному (УВ) составу типичного ТМ. На основе этих данных удается составить некоторую эквивалентную формулу типового УВ в виде $C_n H_m$, где параметр $n \cong 23$, а соотношение $H : C$ близко к двум. При высоких температурах используются в качестве исходных данные по номенклатуре смеси (набор УВ, атомов, ионов и радикалов), полученные в ходе расчета химического равновесия [1].

Для построения УС реального газа и жидкости, а также уравнений для линии насыщения использовались данные по давлению насыщения при низких температурах и некоторый объем данных по плотности и сжимаемости. Предложенная в работе процедура может быть использована при выборе новых данных по свойствам, что приведет к некоторому изменению набора полученных констант УС.

4.2.1. Данные по составу. ТМ имеет сложный углеводородный состав, включая в основном парафиновые, нафтеновые и ароматические (УВ) со средней молекулярной массой 220÷340 [3, 4, 19]. Более полный состав указан в таблице 4.1.

Таблица 4.1. Типовой состав ТМ [4]

Класс соединений	Весовая доля, %
Парафины	10÷15
Нафтены	60÷70
Ароматические УВ	15÷20
Асфальто-смолистые вещества	1÷2
Сернистые соединения	<1
Азотистые соединения	<0.8
Нафтеновые кислоты	<0.02
Антиокислительная присадка	0.2-0.5

Термодинамические свойства определяют компоненты с доминирующей долей, поэтому здесь принято, что ТМ включает только УВ, принадлежащие трем классам: парафины, нафтены и ароматические УВ. Этого факта достаточно, чтобы применять стандартные методики расчета теплофизических свойств нефтепродуктов [6–10]. Элементный состав ТМ, $C_{23.69}H_{44.65}$, принят по данным из статьи на сайте об электрических сетях [20]. Соответствующее этой формуле значение молекулярной массы составляет 328.93. Разложение исходного УВ идет по реакции



4.2.2. Плотность, сжимаемость, давление пара. Для построения УС наиболее подходящими представляются данные по сжимаемости из работ [11, 12], приведенные в таблице 4.2.

Таблица 4.2. Плотность ТМ в кг/дм³ по данным [11, 12]

t, °C	Давление, Bar							
	1	500	1000	1500	2000	3000	4000	5000
20	0.874	0.891	0.905	0.916	0.926			
40	0.862	0.882	0.898	0.910	0.920	0.940	0.958	0.973
60	0.848	0.872	0.890	0.904	0.915	0.936	0.954	0.970
80	0.832	0.860	0.881	0.807	0.909	0.930	0.949	0.966

Здесь не конкретизируется марка ТМ, но, в то же время, появляется возможность оценивать влияние температуры. Из данных таблицы 4.2 легко оценить, что при сжатии до давления 100 бар изменение плотности $\Delta\rho/\rho$ составляет 0.38 % при температуре 20 °C и 0.66 % при температуре 80 °C.

Для построения УС использованы два значения плотности: $\rho_1 = 0.874$ и $\rho_2 = 0.832$ кг/дм³ при температурах 20 и 80 °C соответственно. При этих же температурах изотермическая сжимаемость составляет 3.8×10^{-5} и 6.6×10^{-5}

бар⁻¹. Данные по давлению пара приняты по уравнению Антуана, приведенному в нормативном документе [21]. Уравнение имеет вид

$$p_s = 0.133 \times 10^{\left(\frac{A-B}{C+t}\right)} \quad (4.38)$$

где давление определено в кПа, температура в градусах Цельсия. Константы уравнения $A=7.75932$, $B=2524.17$, $C=174.01$, диапазон применимости $164 \div 343$ °С. Максимальное значение температуры соответствует точке кипения. При обработке использованы две температурные точки, рассчитанные по уравнению (4.38): $T_1 = 473.150$ К, $p_1 = 1.362E-02$ бар и $T_2 = 616.150$ К, $p_2 = 1.0021$ бар. Принятых значений плотности, сжимаемости и давления пара оказалось достаточно для оценки всех необходимых параметров УС.

4.2.3. Основные масштабные параметры. Процедура обработки, описанная в разделах 4.1.1÷4.1.3, позволила оценить масштабные параметры уравнения (4.6) для кривой упругости ($T^* = 1404.975$ К, $P^* = 1053.271$ бар), а также параметры уравнения (4.7), определяющего температурную зависимость плотности жидкой фазы ($T_x = 476.9698$ К, $p_x = 0.7413454$ кг/дм³). Найденные в ходе обработки значения критических параметров составили: $T_c = 777.0$ К, $p_c = 13.976$ бар, $\rho_c = 0.2157$ кг/дм³.

4.3. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УС ДЛЯ ОТДЕЛЬНЫХ ОБЛАСТЕЙ ПАРАМЕТРОВ

4.3.1. Определение области параметров. Процедура построения и использования УС начинается с выделения области параметров, каждая из которых имеет собственную форму УС. Предусмотрено 4 области. Области 1 и 2 расположены при температуре, меньшей критической, которая здесь оценена в 777.0 К. Область 1 соответствует реальному газу при давлении, меньшем давления насыщения $p_s(T)$. Область 2 соответствует сжатой жидкости и определяется из условия $p > p_s$. Верхняя граница области 2 соответствует $p_{\max} = 100$ бар. При задании в качестве независимых переменных T, ρ разделение областей 1 и 2 проводится по двум критериям. Прежде всего, сопоставляется вычисленное по УС реального газа (см. раздел 4.1.2) давление $p = p(\rho, T)$ с давлением насыщения (4.6). Если $p(\rho, T) < p_s(T)$ параметры соответствуют области 1. Если же $p(\rho, T) > p_s(T)$, проводится сопоставление заданной плотности ρ и плотности жидкой фазы на линии насыщения ρ_{liq} , вычисляемой по уравнению (4.7). При $\rho > \rho_{\text{liq}}$ заданные параметры соответствуют области 2, при $\rho < \rho_{\text{liq}}$ – двухфазной области, где сосуществуют насыщенные пар и жидкость, так что давление $p(\rho, T) = p_s(T)$.

Области 3 и 4 соответствуют температурам, превосходящим критическую. Область 3 соответствует температурам $777 \div 1700$ К, область 4 – температурам $1700 \div 20\,000$ К. Верхняя граница по давлению для обеих областей $p_{\max} = 100$ бар.

4.3.2. УС реального газа для области 1. При задании в качестве независимых переменных T, ρ вычисления проводятся в следующем порядке:

1. по заданной плотности вычисляется приведенный объем $V_r = \frac{\mu p_c}{RT_c \rho}$; здесь $\mu = 328.93$, давление измеряется в барах, плотность в кг/м³, газовая постоянная $R = 83.14$;
2. по формуле (4.11), где $\rho_r = V_r^{-1}$, $T_r = T/T_c$, вычисляется давление в барах;

3. при выполнении условий $p > p_s$ и $\rho < \rho_{\text{liq}}$, где давление насыщения p_s и плотность ρ_{liq} вычисляются по формулам (4.6), (4.7), принимается, что параметры соответствуют двухфазной области и давление $p = p_s$

4.3.3. УС жидкости для области 2. Используется УС (4.18) в сочетании с уравнениями (4.6) и (4.7). При заданных значения температуры T в К и плотности ρ в кг/дм³, вычисления проводятся в следующем порядке:

1. вычисляется плотность на линии насыщения $\rho_{\text{liq}}(T)$, соотношение (4.7);

2. вычисляется отношение $x = v(T, p) / v_s(T)$, где $v(T, p) = \rho^{-1}$, $v_s(T) = \rho_{\text{liq}}^{-1}$; процедура по выделению области параметров, описанная в разделе 4.3.1, гарантирует, что параметр $x < 1$;

3. вычисляются функция $B = B(T)$ по формуле (4.24) и давление насыщения p_s – по уравнению (4.6);

4. вычисляется давление в барах посредством УС (4.18) в виде явной зависимости давления от параметра x :

$$p = (B + p_s) \exp\left(\frac{1-x}{A}\right) - B$$

4.3.4. УС реагирующей смеси для области 3. При условии, что температура находится в интервале 777.0 ÷ 1700 К по заданной температуре определяется состав смеси, средняя молекулярная масса и параметров УС. Принципы построения УС для области 3 изложены в разделах (4.1.4) и (4.1.2, подраздел «Обобщение на смеси»). Вычисления проводятся в следующем порядке:

1. определяется координата реакции ξ по формуле (4.28);

2. вычисляются мольные доли компонентов по формуле (4.27);

3. вычисляется средняя молекулярная масса по соотношению

$$\bar{\mu} = \frac{\mu}{1 + 16.095\xi}, \text{ где } \mu = 328.93 \text{ молекулярная масса исходного УВ};$$

4. вычисляются константы УС a_m^* , b_m^* в форме (4.16) и используется УС в форме (4.17). При температуре вплоть до 1500 К в УС можно использовать исходные константы a^* , b^* ;

5. при использовании УС (4.17) вычисляется по заданной плотности приведенный объем $V_r = \frac{\bar{\mu} p_c}{RT_c \rho}$;

6. по формуле (4.17), где $\rho_r = V_r^{-1}$, $T_r = T/T_c$, вычисляется давление в барах; фактор $RT\rho/\bar{\mu}$ измеряется в барах, если $R = 83.14$, плотность измеряется в кг/дм³, в барах, температура в К, молекулярная масса в г/моль;

4.3.5. УС реагирующей смеси для области 4. Расчет проводится по формуле (4.31), где давление задается в барах, плотность в кг/дм³, газовая постоянная $R = 83.14$. Средняя молекулярная масса вычисляется по аппроксимирующей формуле (4.32).

4.4. КАЛОРИЧЕСКОЕ УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ

При построении калорического УС, определяющего зависимость энергии от температуры и плотности, используются два независимых источника: опорные термодинамические величины идеального газа, рассчитанные по данным о молекулярных постоянных и термохимии соединений, и, так называемые, изотермические приращения, то есть изменения энергии при переходе к реальному газу или жидкости. Термодинамические соотношения позволяют строго рассчитать изотермические приращения, используя термическое УС. Так термическое УС в форме $p = p(\rho, T)$ изотермическое приращение для энергии вычисляется посредством интегрирования вдоль изотермы

$$\Delta E(\rho, T) = E(\rho, T) - E(\rho = 0, T) = - \int_0^\rho \frac{d\rho}{\rho^2} \left[T \frac{\partial p}{\partial T} - p \right] \quad (4.39)$$

Здесь $E(\rho = 0, T)$ опорное значение энергии в состоянии идеального газа, которое в дальнейшем обозначено как $E^0(T)$. Поскольку физическая модель и вид термического УС оказывается различным для разных областей параметров, соответствующие различия проявляются и в построении калорического УС. Помимо указанных в разделе 4.3.1 областей параметров, здесь в деталях описано вычисление энергии в двухфазной области жидкость-пар.

4.4.1. Опорные значения энергии для идеального газа. Для расчета энергии ТМ в состоянии идеального газа было принято модельное вещество гептадецилциклогексан, $C_{23}H_{46}$. Его брутто-формула формула и физические характеристики близки к основным компонентам ТМ. Структурная формула на рис. 4.1 показывает наличие двух частей, соответствующих двум основным типам УВ ТМ – парафинам и нафтенам.

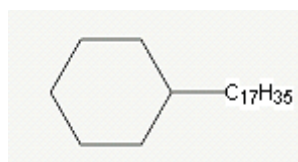


Рис. 4.1. Структурная формула гептадецилциклогексана $C_{23}H_{46}$

Энтальпия образования гептадецилциклогексана в газообразном состоянии оценена по аддитивной схеме с использованием инкрементов, рекомендованных в недавней работе [22]: $\Delta_f H^0(C_{23}H_{46}, g, 298.15) = -477.1 \pm 5$ кДж/моль. Этой величине соответствует «нулевая» энергия

$$E_0 = \frac{\Delta_f H^0 \times 10^3 - R \times T_0}{M} = -1486.6 \text{ кДж/кг} \quad (4.40)$$

(здесь использовано значение $M = 322.6$). Далее нулевая энергия вычитается из рассчитанных значений энергии, так что в калорическом УС будет

фигурировать в качестве опорной величины функция $E^0(T) = E(T) - E_0(T)$. Принятое определение означает, что в точке $T = 298.15$ К энергия строго равна нулю.

Для расчета энергии исходного УВ при произвольной температуре необходимы значения изменения энтальпии, $H^0(T) - H^0_{298}$. Эти значения, оцененные в монографии А.А. Введенского [23], приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3. Изменение энтальпии модельного соединения

T	298.15	300	400	500	600	700	800	900	1000
$H^0(T) - H^0_{298}$	0	0.917	57.652	127.395	208.519	299.451	398.751	505.135	617.484

Примечание: температура в К, изменение энтальпии в кДж/моль.

В согласии с определением (4.40), энергия соединения вычислена из этих данных по формуле

$$E^0(T) = E - E_0 = \frac{(H^0(T) - H^0_{298}) - R \times (T - 298.15)}{M} \quad (4.41)$$

Таблица 4.4. Энергия модельного соединения (4.41).

T	298.15	300	400	500	600	700	800	900	1000
$E^0(T)$	0	2.795	176.086	389.699	638.591	917.886	1223.12	1550.314	1895.998

Примечание: температура в К, энергия в кДж/кг

Полученная зависимость аппроксимирована квадратичной функцией энергии в кДж/кг от аргумента $x = T - 298.15$, см. рис. 4.2.

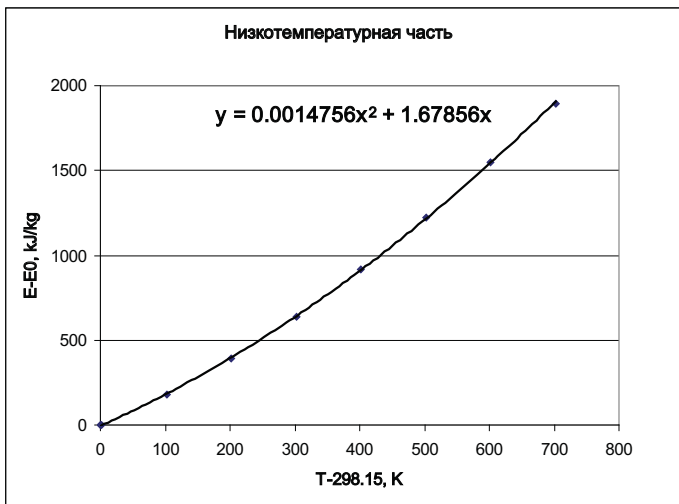


Рис. 4.2. Зависимость энергии от температуры (низкотемпературная часть).

В области высоких температур 2000÷20000 К энергия вычислялась по результатам равновесного расчета состава продуктов диссоциации ТМ [1] и аппроксимирована линейной функцией:

$$E^0(T) = E(T) - E_0 = 23.584 \times (T - 298.15) - 33584 \quad (4.42)$$

Таблица 4.5.

Энергия продуктов диссоциации ТМ в высокотемпературной области (4.42)

T	2000	3000	5000	7000	10000	15000	20000
$E^0(T)$	6553.4	13553.6	85033.3	100602.3	122378.4	281342.3	431074.1

Примечание: температура в К, энергия в кДж/кг

Аналогично описана промежуточная область 1000÷2000 К:

$$E^0(T) = E(T) - E_0 = 4.0324 \times (T - 298.15) - 1128.3 \quad (4.43)$$

4.4.2. Область 1 – реальный газ при температуре $T < T_c$. Термическое УС для этой области принято в виде (4.8) или (4.11). Тожество (4.39) позволяет в этом случае получить точное выражение для изотермического приращения

$$\Delta E(\rho, T) = \frac{a}{b} \ln \frac{V}{V+b} = -4.9RT_c \ln(1 + b^* \rho_r) \quad (4.44)$$

Обозначения и численные значения констант приведены в разделах 4.1.2, 4.3.2. Отсюда следует, что приращение зависит только от плотности, но не температуры. С учетом опорных значений, энергия зависит от параметров состояния в соответствии с уравнением

$$E(\rho, T) = E^0(T) - 96.23 \ln(1 + b^* \rho_r) \quad (4.45)$$

Здесь энергия выражена в кДж/кг, параметр $b^* = 0.08664$, приведенная плотность $\rho_r = \rho RT_c / (p_c \mu)$, плотность ρ выражена в кг/дм³, критическое давление p_c в барах, постоянная $R = 83.14$, $\mu = 328.93$, критические постоянные приведены в разделе 4.2.3. Соотношения данного раздела применимы только при давлении $p \leq p_s$ – см. раздел 4.3.1.

4.4.3. Двухфазная область. Область соответствует диапазону плотностей $\rho_{\text{vap}} \leq \rho \leq \rho_{\text{liq}}$, где ρ_{vap} , ρ_{liq} – плотности газа и жидкости на линии насыщения. Плотность ρ_{vap} определяется из решения уравнения

$$p_s(T) = \frac{RT \rho_{\text{vap}}}{\mu} \times \left[\frac{1}{1 - b^* \rho_r} - \frac{a^* \rho_r}{T_r (1 + b^* \rho_r)} \right] \quad (4.46)$$

в котором фигурируют давление насыщения $p_s(T)$, определяемое уравнением (4.6), и приведенная плотность $\rho_r = \rho_{\text{vap}} RT_c / (p_c \mu)$, причем используются те же единицы измерения, что и выше. Плотность ρ_{liq} определяется из реше-

ния уравнения (4.7). Зная плотности обеих фаз на линии равновесия, можно определить энергию жидкой фазы

$$E(T, \rho_{\text{liq}}) = E(T, \rho_{\text{vap}}) - \Delta E_{\text{vap}} \quad (4.47)$$

Первое слагаемое в правой части определяет уравнение (4.45), ΔE_{vap} – вычисленная ниже энергия испарения, то есть разность энергий газовой и жидкой фаз на линии насыщения. При произвольной плотности, отвечающей сосуществованию обеих фаз

$$E(T, \rho) = E(T, \rho_{\text{vap}}) - (1 - x) \Delta E_{\text{vap}} \quad (4.48)$$

где x , так называемый, параметр сухости, определяющий массовую долю газа. Поскольку удельный объем в двухфазной области $\nu = \nu_{\text{vap}}x + \nu_{\text{liq}}(1 - x)$, параметр сухости вычисляется по формуле

$$x = \frac{\rho_{\text{vap}}}{\rho} \times \frac{\rho_{\text{liq}} - \rho}{\rho_{\text{liq}} - \rho_{\text{vap}}} \quad (4.49)$$

где ρ плотность вещества в двухфазной области, когда $\rho_{\text{vap}} \leq \rho \leq \rho_{\text{liq}}$.

Энергия испарения. В соответствии с определением (4.47), энергия испарения

$$\Delta E_{\text{vap}} = \Delta H_{\text{vap}} - p_s \Delta V, \Delta V = V_{\text{vap}} - V_{\text{liq}} \quad (4.50)$$

Для энтальпии испарения есть как строгое соотношение Клаузиуса-Клапейрона, так и приближенные корреляции. Первое связывает энтальпию испарения с кривой упругости (4.6)

$$\Delta H_{\text{vap}} = T \frac{dp_s}{dT} \Delta V \quad (4.51)$$

В принципе все необходимые ингредиенты для использования формулы (4.51) приведены выше. Однако, более оправданной для упрощения расчета является приближенная корреляция, рекомендованная в [13]

$$\frac{\Delta H}{RT_c} = 7.08(1 - T_r)^{0.354} + 10.95\omega(1 - T_r)^{0.456} \quad (4.52)$$

где ω – ацентрический фактор, определяемый по давлению пара при $T_r = 0.7$. Из уравнения (4.6), построенного по небольшому объему данных, получено значение $\omega = 0.933$.

Последовательность вычислений для двухфазной области:

1. вычисляется приведенное значение энтальпии испарения по формуле (4.52); чтобы получить значение в кДж/кг следует приведенное значение умножить на величину $RT_c / \mu = 19.6$;
2. вычисляются значения плотности обеих фаз на линии сосуществования ρ_{vap} , ρ_{liq} , соотношения (4.46) и (4.7);
3. вычисляется значение энергии испарения в кДж/кг

$$\Delta E_{\text{vap}} = \Delta H_{\text{vap}} - 10 \times \left(\frac{p_s}{\rho_{\text{vap}}} - \frac{p_s}{\rho_{\text{liq}}} \right)$$

где давление насыщения задается в Bar'ах, плотности в кг/дм³ ;

4. для двухфазной области определяется параметр сухости (4.49) и энергия системы (4.48); предварительно определяется энергия насыщенного пара по формуле (4.45).

4.4.4. Область 2 – жидкая фаза. Принадлежность состояния к этой области определяется по двум критериям: $p > p_s$, $\rho > \rho_{\text{liq}}$. Изменение энергии при переходе от давления насыщения p_s к давлению $p > p_s$ определяет строгое соотношение

$$\Delta E = \int_{p_s}^p \left(v - T \frac{dv}{dT} \right) dp - \Delta(pv), \Delta(pv) = pv(p, T) - p_s(T)v_s(T) \quad (4.53)$$

с учетом того, что термическое УС жидкости определяет удельный объем как функцию давления и температуры $v(T, p)$, $v_s(T) = \rho_{\text{liq}}^{-1}$ (см. раздел 4.1.3). Использование полученных там выражений с учетом конкретных значений найденных констант позволило дать относительно простую оценку в виде

$$\Delta E = \zeta v_s \times \left[Ap \ln \frac{B+p}{B+p_s} - \Delta p \right] \quad (4.54)$$

где $\Delta p = p - p_s$, константа A и функция $B = B(T)$ определены в разделе 4.1.3. Это соотношение определяет изменение энергии на изотерме при переходе от линии насыщения к состоянию сжатой жидкости. Параметр $\zeta \cong 1.55$ выбран так, чтобы согласовать значения ΔE на критической изотерме при максимальном давлении 100 Bar. Энергия $E(\rho, T)$ в кДж/кг для жидкой фазы при заданной плотности определяется по формуле

$$E(T, \rho) = E(T, \rho_{\text{vap}}) - \Delta E_{\text{vap}} + 0.1 \zeta v_s \times \left[Ap \ln \frac{B+p}{B+p_s} - \Delta p \right] \quad (4.55)$$

Явное выражение для давления в барах по заданной плотности в кг/дм³ определяет уравнение в разделе 4.3.3 (пункт 4). Вычисление основных ин-гридиентов, а именно $E(T, \rho_{\text{vap}})$, ΔE_{vap} , v_s обсуждается выше, разделы 4.4.2 и 4.4.3.

4.4.5. Область 3 – температуры в интервале $T_c < T < 2000 \text{ K}$. Как показано в разделе 4.1.4, при температуре, меньшей 1500 K, сохраняет силу то же УС, что и для области 1. В диапазоне 1500÷1700 K последовательно снижаются до нуля концентрация исходного УВ и константы УС в соответствии с (4.16). Отсюда следует, что при $T \leq 1500 \text{ K}$ энергия $E(\rho, T)$ определяется тем же соотношением (4.44) – изотермическое приращение остается постоянным по величине при фиксированной плотности.

В интервале 1500÷1700 К плавно снижаются константы УС, поскольку для смеси $a_m = ax_1^2$, $b_m x_1$, где x_1 мольная доля УВ. Последовательное вычисление интеграла в (4.39), с учетом температурной зависимости $x_1(T)$, принятой в разделе 4.1.4, приводит к довольно громоздкому выражению, не оправданному в рамках приближенной методики. Вместо этого, можно использовать линейную интерполяцию, обеспечивающее гладкий переход величин, вычисленных при 1500 и 1700 К

$$\Delta E(\rho, T) = \Delta E(\rho, T = 1500) + \Delta E(\rho, T = 1700) \times \frac{(T - 1500)}{200} \quad (4.56)$$

где функция $\Delta E(\rho, T = 1500) = -96.23 \ln(1 + b^* p_r)$ кДж/кг, согласно (4.45). Функция $\Delta E(\rho, T)$, определяющая изменение энергии при температуре, превышающей 1700 К, получена в следующем разделе.

4.4.6. Область 4 – температуры в интервале 2000 < T < 20 000 К. В этой области для продуктов распада применимо идеально-газовое УС с переменной молекулярной массой μ (4.32). За счет вариации состава при изменении плотности (или давления) меняются также все калорические функции, включая энергию. Поэтому подынтегральное выражение в тождестве (4.39), определяющем изменение энергии при сжатии вещества, отлично от нуля, несмотря на отсутствие «физической неидеальности»

$$\Delta E(\rho, T) = E(\rho, T) - E(\rho_0, T) = RT \int_{\rho_0}^{\rho} \frac{d\rho}{\rho\mu} \times \frac{d\bar{\mu}}{dT} \quad (4.57)$$

Здесь интеграл определяет приращение энергии при переходе от плотности ρ_0 , отвечающей давлению в 1 бар, к некоторой величине плотности $\rho > \rho_0$. Согласно данным из раздела (4.1.5), в интервале давлений 1÷100 бар молекулярная масса меняется относительно слабо, что позволяет вынести из под интеграла факторы, включающие $\mu = \mu(T, p) \cong \mu(T)$

$$\Delta E(\rho, T) = \frac{RT}{\mu} \times \frac{d \ln \bar{\mu}}{d \ln T} \times \ln \frac{\rho}{\rho_0} \quad (4.58)$$

Если принять аппроксимацию (4.32) для молекулярной массы, следует положить

$$\frac{d \ln \bar{\mu}}{d \ln T} = -\nu, \nu = 0.72109 \quad (4.59)$$

что окончательно дает уравнение

$$\Delta E(\rho, T) = -\frac{RT\nu}{\mu} \times \ln \frac{\rho}{\rho_0} = -\frac{RT\nu}{\mu} \ln \left[10 \times \frac{\rho RT}{\rho_0 \mu} \right] \quad (4.60)$$

Здесь величина $\Delta E(\rho, T)$ выражена в кДж/кг, если принять для газовой постоянной значение $R = 8.314$ Дж/(моль·К) и выразить плотность ρ в кг/дм³, давление $p_0 = 1$ Бар, μ – средняя молекулярная масса в г/моль. Заметим, что

при использовании УС типа уравнения Ван-дер-Ваальса (4.8) в интеграле (4.39) для величины ΔE в качестве нижнего предела использовано значение $V = \infty$ (то есть, $\rho = 0$), в то время как в интеграле (4.57) нижний предел равен малой плотности, отвечающей опорному давлению в 1 Bar. Различие связано с тем, что принятая аппроксимация ограничена интервалом давлений, за пределом которого начнет сказываться его влияние на величину молекулярной массы μ . В то же время, влияние давления на величину энергии в интервале от нуля до 1 Bar пренебрежимо мало. Поэтому зависимость энергии от плотности в области 4 можно определить, следуя соотношению

$$E(\rho, T) = E^0(T) + \begin{cases} \Delta E(\rho, T) & \rho \geq \rho_0 \\ 0 & \rho < \rho_0 \end{cases} \quad (4.61)$$

где использовано выражение (4.60) и величина $\rho_0 = p\bar{\mu}/(RT)$.

Для линейной интерполяции (4.56) надо располагать значением $\Delta E(\rho, T)$ при $T = 1700\text{K}$. Подставляя численные значения параметров, получим

$$\Delta E(\rho, T) = -\frac{RTv}{\mu} \times \ln \left[\frac{p}{p_0} \right] = -442.4 \times \ln \left[\frac{p}{p_0} \right] \quad (4.62)$$

Здесь $\Delta E(\rho, T)$ выражено в кДж/кг, давление определяется уравнением (4.31), прочие размерности упомянуты выше. При этом молекулярная масса $\mu = \mu(T = 1700) = 23$, в то время как первое слагаемое в интерполяции (4.56) рассчитано при $\mu = 328.93$. При $\rho \leq \rho_0$ оба члена в интерполяции следуют положить равными нулю.

Заключение по разделу 4.1

1. На основе предыдущих исследований разработаны термическое и калорические УС трансформаторного масла (ТМ) и продуктов его разложения в широком интервале параметров: по температуре от комнатных до 20 тысяч К при давлении, не превышающем 100 Bar.

2. УС представляет систему аналитических выражений для 4 выделенных областей: реальный газ до критической температуры, жидкая фаза, область сверхкритических температур, где начинается разложение исходных УВ, и область высоких температур, где гарантированно выполняются условия химического равновесия.

3. Физическая картина и модели для сложной смеси тяжелых УВ заимствованы из литературы по методам расчета теплофизических свойств нефтепродуктов.

4. В области докритических температур УС газовой фазы построено на основе ГСС состояний с использованием данных по плотности и давлению пара ТМ; УС жидкости построено в виде уравнения Тейта с использованием данных по малой сжимаемости жидкой фазы.

5. При температурах, превышающих примерно 2000 К, проведены расчеты состава, показавшие, что средняя молекулярная масса плавно меняется с ростом температуры и слабо зависит от давления в заданном диапазоне; УС

в этой области идентично обычному уравнению для идеального газа при известной температурной зависимости молекулярной массы.

6. Оценка кулоновского взаимодействия показала, что при наибольших значениях температуры и давления оно способно изменить давление и фактор сжимаемости всего на 5 %.

7. В промежуточной области (1000÷2000 К) имеет место сложная картина, связанная с частичным распадом УВ при сохранении Ван-дер-ваальсовского взаимодействия. Для этой области использована приближенная модель кинетической заторможенности процесса распада. На основе этой модели рассчитан состав системы, средняя молекулярная масса и константы УС.

8. В разделе 4.4 построено калорическое УС, объединяющее опорные данные по значениям энергии в состоянии идеального газа с расчетом изотермических приращений $\Delta E(\rho, T)$, связанных как с физической неидеальностью, так и с изменением состава продуктов диссоциации ТМ.

Литература

1. Отчет о научно-исследовательской работе. Совершенствование взрывобезопасности и взрывозащищенности высоковольтного маслонаполненного электротехнического оборудования ОАО «ФСК ЕЭС». Расчетно-теоретические исследования. Этап 1. ОИВТ РАН, Москва, 2008.

2. О построении уравнения состояния трансформаторного масла. Отчет ОИВТ РАН, Лаборатория баз данных по свойствам веществ и материалов (№1.6.2), 2009.

3. *Р.А. Липштейн, М.И. Шахнович.* Трансформаторное масло. Изд. 2-е, переработанное и дополненное. М.: «Энергия», 1968.

4. Справочник по электротехническим материалам: в 3-х т. Под ред. Ю.В.Корицкого и др. – 3-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, Том 1. – 1986. – 368 с., Том 2. – 1987.

5. *И.Г. Анисимов, К.М. Бадьштова, С.А. Бнатов и др.* Топлива, смазочные материалы, технические жидкости. Ассортимент и применение. Справочник. Под ред. В.М. Школьников. Изд. 2-е перераб. и доп. М.: Издательский центр «Техинформ», 1999.

6. *В.Ф. Абросимов, В.К. Безуглый, Н.К. Болотин и др.* Методы расчета теплофизических свойств газов и жидкостей. М.: «Химия», 1974.

7. *Н.К. Болотин, Г.С. Дорочинская, Э.К. Дрегуляс и др.* Унифицированные методы расчета на ЭВМ теплофизических свойств углеводородов, их смесей, нефтей и нефтяных фракций. М.: Изд-во стандартов, 1976.

8. *Г.Г. Рабинович, П.М. Рябых, П.А. Хохряков и др.* Расчеты основных процессов и аппаратов нефтепереработки: Справочник. М.: «Химия», 1979.

9. Расчет теплофизических свойств нефтепродуктов: Обзор. информ./ А.М. Шеломенцев; Госстандарт; ВНИЦ МВ; М-во нефтеперераб. и нефтехим. пром-ти СССР; ВНИИПКНефтехим. М.: Изд-во стандартов, 1985. (Проблемы развития Гос. службы стандарт. справ. данных). Составитель канд. физ.-мат. наук А.М. Шеломенцев.

10. *Б.А. Григорьев, Ю.Л. Расторгуев, Е.В. Ковальский, Н.В. Шевченко* Плотность (удельный объем) жидких нефтей и нефтепродуктов. Грозный, 1979.

11. *В.Н. Разумихин*. Гидростатический метод определения плотности жидкостей при давлении до 5000 кгс/см². Труды институтов Комитета стандартов, мер и измерительных приборов. 1960, вып. 46 (106), стр. 96–106.

12. *А.Д. Ехлаков, К.П. Родионов*. Гидростатический метод измерения сжимаемости жидкостей под высоким давлением. Физика металлов и металловедение. 1960, том IX, вып. 6, стр. 932–935.

13. *Р. Рид, Дж. Праусниц, Т. Шервуд*. Свойства газов и жидкостей. 3е издание, переработанное и дополненное. Пер. с англ. Ленинград, «Химия», Ленинградское отделение, 1982.

14. *П.М. Кессельман, С.А. Иншаков*. Жидкости при высоких давлениях. Термодинамические свойства. М.: ВНИЦ СМВ, 1992.

15. *Л.П. Филиппов*. Подobie свойств веществ. М.: Изд-во МГУ, 1978.

16. Принцип соответственных состояний для газов и жидкостей. Применение термодинамического фактора корреляции. Обзорная информация. Шеломенцев А.М.; Госстандарт; ВНИЦ МВ; Министерство нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности СССР; ВНИИПКНефтехим. М.: Изд-во стандартов, 1985.

17. *Ю.М. Жоров*. Термодинамика химических процессов. Нефтехимический синтез, переработка нефти, угля и природного газа. Москва, «Химия», 1985.

18. *Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц*. Статистическая физика. Издание 2е, переработанное. Изд-во «Наука», Москва, 1964.

19. *Л.Р. Хабибуллина, Р.Г. Ибрагимов, А.В. Коваль, В.П. Тутубалина*.

Влияние некоторых факторов на эксплуатационные свойства трансформаторных масел. <http://www.ephf.ispu.ru/iff/publ/konf1/stat17.htm>

20. <http://leg.co.ua/transformatori/teoriya/uglevodorodnaya-chast-transformatornogo-masla.html>

21. ВНТП 05–97. Система нормативных документов Министерства путей сообщения Российской Федерации. Ведомственные нормы технологического проектирования. Определение категорий помещений и зданий предприятий и объектов железнодорожного транспорта по взрывопожарной и пожарной опасности. Дата введения 1997–08–01

22. *Maarten K. Sabbe, Mark Saeys, M.-F. Reyniers, et al.* Group Additive Values for the Gas Phase Standard Enthalpy of Formation of Hydrocarbons and Hydrocarbon Radicals. J. Phys. Chem. A 2005, 109, p.7466–7480.

23. *А.А. Введенский*. Термодинамические расчеты нефтехимических процессов. Л., «Гостоптехиздат», 1960. 576 с.

ГЛАВА 5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УДАРНОЙ СЖИМАЕМОСТИ ТМ В ИНТЕРВАЛЕ ДАВЛЕНИЙ 0.01–10.0 ГПа

Представлены данные по уравнению состояния и результаты измерений ударных адиабат трансформаторного масла в интервале давлений 0.01–10.0 ГПа. Ударные волны в исследуемых образцах создавались с помощью взрывных устройств. В опытах регистрировалась скорость ударной волны и массовая скорость в исследуемом образце, измеряемая лазерным интерферометром VISAR.

Для получения импульсов сжатия малой амплитуды (порядка 1 кбар) и длительностью около 10 мкс была разработана экспериментальная сборка, представленная на рис. 5.1. Ударные волны инициировались зарядом ВВ, в качестве которого использовался прессованный А-IX-1, диаметр заряда составлял 20 мм, вес – 20 г. Параметры ударной волны варьировались изменением толщины слоя воды между ВВ и исследуемым образцом. С целью определения характера зависимости амплитуды и длительности импульсов от пройденного ими расстояния были проведены предварительные эксперименты, в которых с помощью лазерного интерферометра VISAR регистрировалась массовая скорость за фронтом ударной волны. Для отражения лазерного луча, внутри воды, на фиксированном расстоянии от ВВ помещалась алюминиевая фольга толщиной 100–200 мкм.

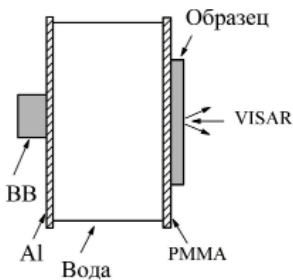


Рис. 5.1. Схема экспериментальной сборки

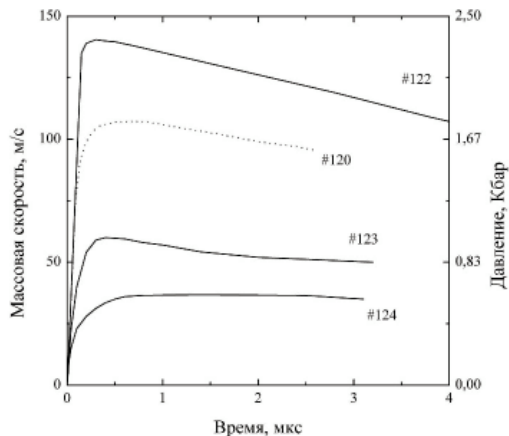


Рис. 5.2. Профили массовой скорости и давления в воде на различных расстояниях от заряда ВВ

Результаты измерений на расстояниях 50, 100 и 150 мм представлены на рис. 5.3. В опытах использовалась постоянная интерферометра равная 80.8 м/с, что позволяло проводить измерения с точностью до ± 3 м/с. Как видно из проведенных экспериментов, на расстоянии 100 мм от заряда удастся получить импульсы сжатия необходимой амплитуды и длительности.

Использование относительно толстой фольги обеспечивало надежную регистрацию массовой скорости, но одновременно приводило к размытию фронта. Поэтому измеренная в опытах ширина скачка превышает ширину фронта ударной волны в воде.

На рис. 5.3 те же результаты представлены в виде зависимости амплитудных значений скорости и давления от пройденного расстояния r . Максимум скорости u_m за фронтом ударной волны уменьшается по закону $u_m = \text{const}/r^n$, где $n = 1.22$, $\text{const} = 16530$ при измерении расстояния в мм и скорости в м/с.

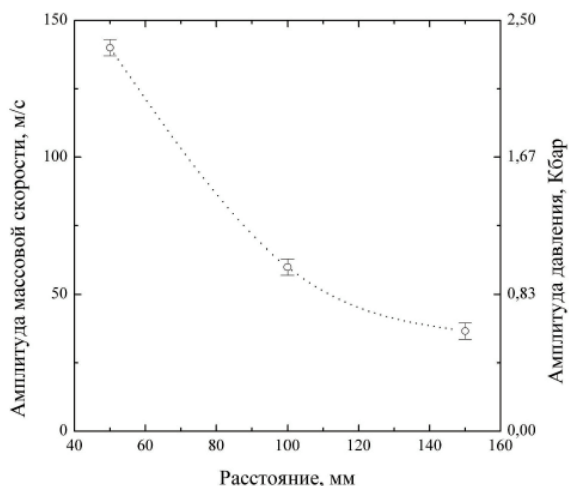


Рис. 5.3. Изменение амплитуды ударной волны с увеличением толщины слоя воды

Амплитуду ударной волны можно варьировать изменением не только расстояния, но и веса используемого заряда ВВ. В качестве примера на рис. 5.2 пунктирной линией (опыт #120) приведен профиль давления, полученный на расстоянии 50 мм, при весе заряда 10 г. Уменьшение веса в два раза привело к уменьшению массовой скорости примерно на 25 %. Необходимо, однако, учитывать, что снижение веса ВВ ухудшает воспроизводимость экспериментов, и навеску в 20 г следует, по-видимому, считать минимальной при использовании прессованного А-IX-1.

Формирующаяся в воде ударная волна является расходящейся, что необходимо учитывать при интерпретации экспериментальных данных. В реальной ситуации уменьшению кривизны фронта способствует использование алюминиевого экрана толщиной 2 мм, находящегося между ВВ и водой (рис. 5.1).

Отметим, что во всех проведенных опытах геометрические размеры сборки выбирались таким образом, чтобы исключить влияние боковой поверхности в течение всего времени регистрации волнового профиля. Если это условие не выполняется, например, база, на которой проводятся измерения, больше половины диаметра оболочки с водой, то результаты могут заметно отличаться от полученных выше. Причем наличие жесткой (по сравнению с водой) оболочки может замедлить скорость затухания волн и

привести к повышению их параметров в заданном сечении. И наоборот, использование оболочки с малой жесткостью может снизить параметры волн.

Для исследования ударной сжимаемости ТМ в области высоких давлений использовались калиброванные взрывные метательные устройства, обеспечивающие плоское метание алюминиевых (АД-1) ударников диаметром 70–100 мм и толщиной 2–10 мм со скоростями 1–5 км/с. Нагружение образцов осуществлялось через алюминиевые и медные экраны. Схема экспериментов приведена на рис. 5.4. Каждый эксперимент состоял из двух частей. Сначала выполнялась контрольная калибровка метательного устройства (рис. 5.4а): при этом ударник нагружал металлический экран, на обратной стороне которого располагался тонкий (толщиной около 50 мкм) пьезоэлектрический датчик диаметром 30 мм, использовавшийся в качестве «метки времени». В центре на обратной стороне экрана была накатана алюминиевая фольга толщиной 7 мкм, на которую падал луч лазера с длиной волны 514,5 нм. Отраженное от фольги излучение собиралось линзой с диаметром около 1 см и фокусным расстоянием 14 см и направлялось в лазерный интерферометр VISAR, принцип работы которого изложен во второй главе. Измерения проводились через водяное окно. Затем проводились измерения параметров ударного сжатия ТМ. Схема эксперимента (рис. 5.4б) была аналогична той, что использовалась при калибровке взрывного метательного устройства, только в центре на обратной стороне экрана располагался исследуемый образец, на заднюю поверхность образца наклеивалась алюминиевая фольга толщиной 200 мкм.

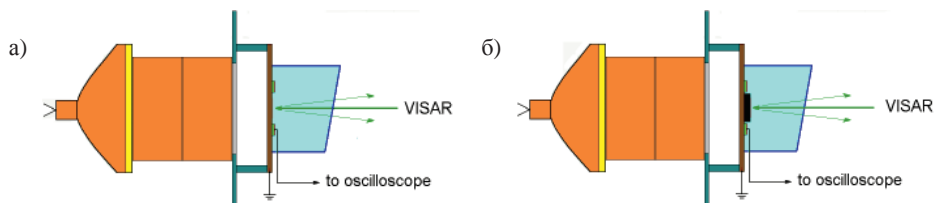


Рис. 5.4. Схема эксперимента по калибровке взрывного метательного устройства (а) и схема эксперимента по измерению параметров ударного сжатия соли (б)

В схеме, приведенной на рис. 4.4а, алюминиевый ударник толщиной $h = 2$ мм и диаметром $D = 70$ мм запрессовывался в стальное кольцо толщиной 2 мм и внешним диаметром 150 мм. На базе полета равной 25 мм скорость ударника составляла 5.05 км/с. Разгон ударника осуществлялся продуктами взрыва двух таблеток из прессованного ВВ А-IX-1 диаметром 80 мм и массой 330 г каждая. Инициирование детонации осуществлялось плосковолновым взрывным генератором диаметром 100 мм. При соударении с экраном формируется ударная волна, амплитуда и длительность которой определяются параметрами как ударника, так и экрана. На рис. 5.5 показан профиль скорости на границе 2 мм алюминиевого ударника и водяного окна. Видно, что после ударного скачка скорость остается практически постоянной в течение примерно 350 нс, а затем резко уменьшается в результате прихода разгрузки со стороны ударника (момент прихода волны разгрузки указан

стрелкой). Поскольку длительность «полки» с постоянными параметрами мала, то при применении данного ударника необходимо использовать образцы малой толщины (не более 5–6 мм). В противном случае ударная волна в образце начнет затухать, и это приведет к большой погрешности определения точки на ударной адиабате.

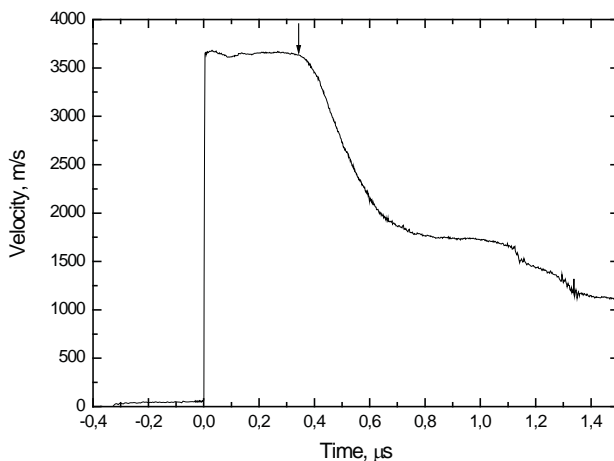


Рис. 5.5. Профиль скорости на границе 2 мм Al экрана – водяное окно для взрывного метательного устройства, показанного на рис. 4а. Скорость алюминиевого ударника 5.05 км/с, диаметр $D = 70$ мм, толщина $h = 2$ мм

Другие метательные устройства, которые использовались в работе, показаны на рис. 5.6–5.8. В схеме на рис. 5.6а для разгона ударника (3) используется только плосковолновая линза (1). В этом случае на выходе из стального кольца (2) скорость алюминиевого ударника диаметром 90 мм и толщиной 7 мм равна 1.15 км/с.

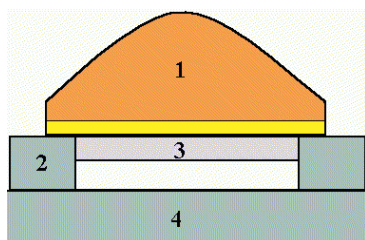


Рис. 5.6а. Взрывное метательное устройство: 1 – взрывная линза, А-IX-1/парафин, $D = 100$; 2 – фокусирующее кольцо, сталь, $D_{\text{ext}} = 150$, $h = 16$; 3 – ударник, Д16Т, $D = 90$, $h = 7$; 4 – мишень. Скорость метания 1.13 км/с. Справа – фотография экспериментальной сборки

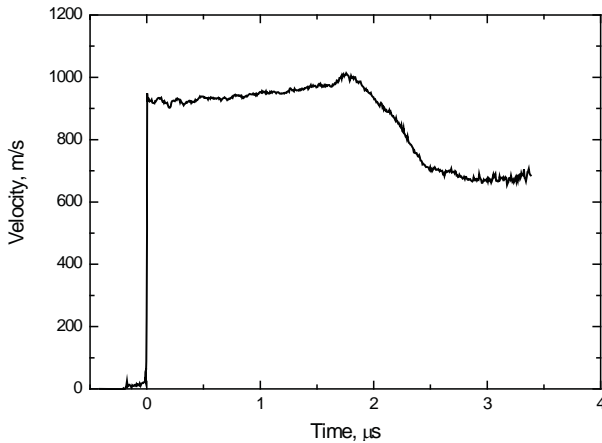


Рис. 5.6б. Профиль скорости на границе 4 мм Al экрана – водяное окно для взрывного метательного устройства, показанного на рис. 5.6а. Скорость алюминиевого ударника 1.15 км/с, диаметр $D = 90$ мм, толщина $h = 7$ мм

Соответствующий профиль скорости на границе 4 мм алюминиевого экрана с водяным окном приведен на рис. 5.6б. В данном случае длительность «полки» с постоянными параметрами составляет 1.7 мкс, что позволяет использовать образцы толщиной 10–15 мм.

Уменьшение толщины алюминиевого ударника до 4 мм позволяет увеличить скорость его метания до 1.46 км/с при использовании только плосковолнового взрывного генератора (рис. 5.7а). В этом случае схема экспериментальной сборки упрощается, поскольку охрannое стальное кольцо можно не использовать. Для уменьшения влияния боковой разгрузки достаточно увеличить диаметр метаемой пластины (2) до 120 мм. На базе полета 8 мм (3) диаметр плоской части ударника превышает 40 мм. Типичный профиль скорости, измеренный на границе 4 мм алюминиевого экрана с водяным окном, приведен на рис. 5.7б. Время, в течение которого параметры за ударной волной остаются практически постоянными, составляет 0.9 мкс, что, как и в случае с 7 мм ударником, позволяет использовать достаточно толстые (до 15 мм) образцы.

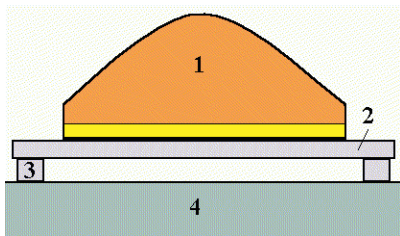


Рис. 5.7а. Взрывное метательное устройство: 1 – взрывная линза, А-IX-1/парафин, $D = 100$; 2 – диск Д16Т, $D = 150$, $h = 4$; 3 – столбики, фиксирующие подлетную базу $D = 20$, $h = 8$; 4 – мишень. Метается центральная часть алюминиевого диска, вырывающаяся взрывом. Скорость метания 1.46 км/с. Справа – фотография экспериментальной сборки

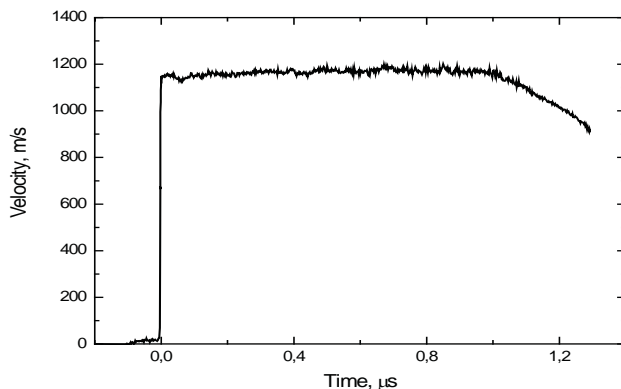


Рис. 4.7б. Профиль скорости на границе 4 мм Al экрана – водяное окно для взрывного метательного устройства, показанного на рис. 5.7а. Скорость алюминиевого ударника 1.46 км/с, диаметр $D = 40$ мм, толщина $h = 4$ мм

Для разгона алюминиевого ударника толщиной 10 мм и диаметром 90 мм использовалась схема, показанная на рис. 5.8а. В данном случае ударник (4) запрессовывался в стальное кольцо (3) толщиной 16 мм и разгонялся продуктами взрыва таблетки А-IX-1 (2) диаметром 120 мм и массой 600 г, инициирование детонации в которой осуществлялось плосковолновым генератором (1). Отметим, что в отличие от схемы, приведенной на рис. 4.6а, ударник отделялся от таблетки ВВ воздушным зазором, что позволяло избежать откольного разрушения ударника. Скорость метаемой пластины на базе 25 мм составляла 2.5 км/с. Соответствующий профиль скорости на границе 4 мм Al экрана с водяным окном показан на рис. 5.8б. Видно, что течение за ударной волной остается постоянным более 2 мкс (стрелкой отмечен момент прихода разгрузки со стороны ударника), что не накладывает ограничений на толщину исследуемого образца.

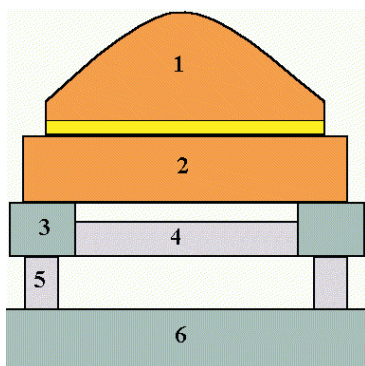


Рис. 5.8а. Взрывное метательное устройство: 1 – взрывная линза, А-IX-1/парафин, $D = 100$; 2 – ВВ А-IX-1, $D = 120$, $h = 30$; 3 – фокусирующее кольцо, сталь, $D_{\text{ext}} = 150$, $h = 16$; 4 – ударник, Д16Т, $D = 90$, $h = 10$; 5 – столбики, фиксирующие подлетную базу, $D = 20$, $h = 25$; 6 – мишень. Скорость метания 2.5 км/с. Справа – фотография экспериментальной сборки

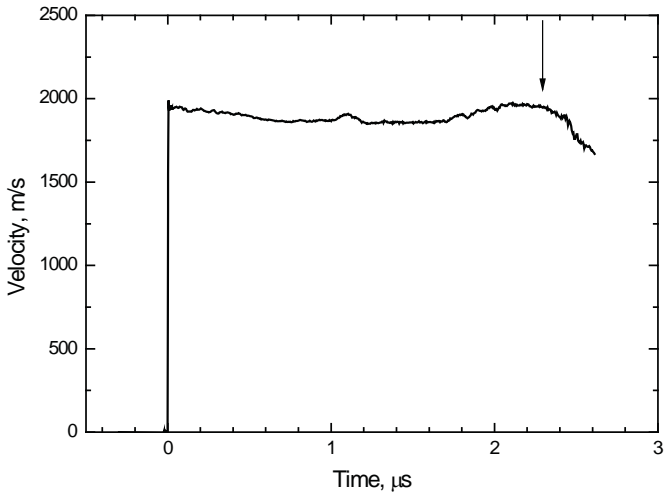


Рис. 5.8б. Профиль скорости на границе 4 мм Al экрана – водяное окно для взрывного метательного устройства, показанного на рис. 5.8а. Скорость алюминиевого ударника 2.5 км/с, диаметр $D = 70$ мм, толщина $h = 10$ мм

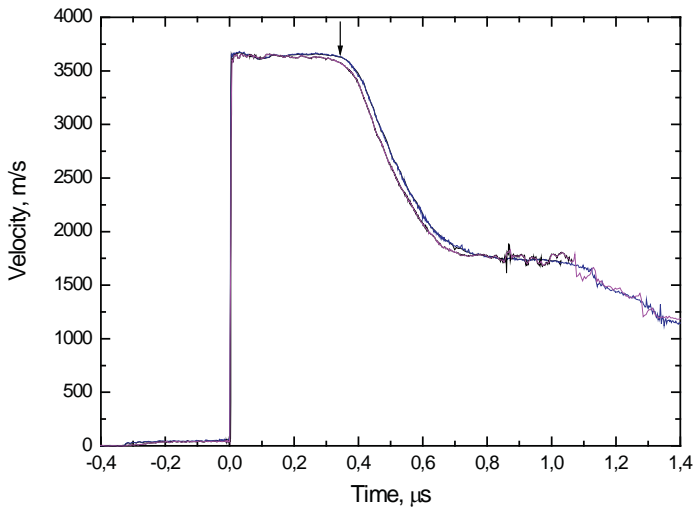


Рис. 5.9. Профили скорости на границе 2 мм алюминиевого экрана с водяным окном для двух различных экспериментов при использовании взрывного метательного устройства, приведенного на рис. 5.4а

Отработанные взрывные метательные устройства перекрывают необходимый диапазон давлений, в котором необходимо исследовать ударную сжимаемость ТМ. Кроме того, параметры разгоняемых ударников (их скорость и форма) хорошо воспроизводятся от опыта к опыту, что значительно повышает достоверность полученных результатов. В качестве иллюстрации на рис. 5.9 показаны профили скорости на границе 2 мм алюминиевого экрана с водяным окном для двух различных экспериментов при использовании взрывного метательного устройства, приведенного на рис. 5.4а. Видно, что хорошо воспроизводится не только абсолютное значение скорости, но и область постоянных параметров, и спад скорости, вызванный приходом разгрузки со стороны ударника. Отметим также, что поскольку разгон ударников осуществляется в воздухе, то перед ними формируется воздушная ударная волна, амплитуда и длительность которой определяются скоростью ударника и базой полета. На рис. 5.9, например, воздушный предвестник формирует в экране ударную волну, которая опережает волну, вызванную воздействием ударника на 0.3 мкс. Однако, во-первых, амплитуда предвестника незначительна (на рис. 5.9 она не превышает 40 м/с, тогда как максимальная амплитуда более 4.5 км/с), а во-вторых, она полностью затухает при наличии даже незначительных зазоров (менее 100 мкм) между экраном и исследуемым образцом, не оказывая никакого влияния на исследуемые свойства образца.

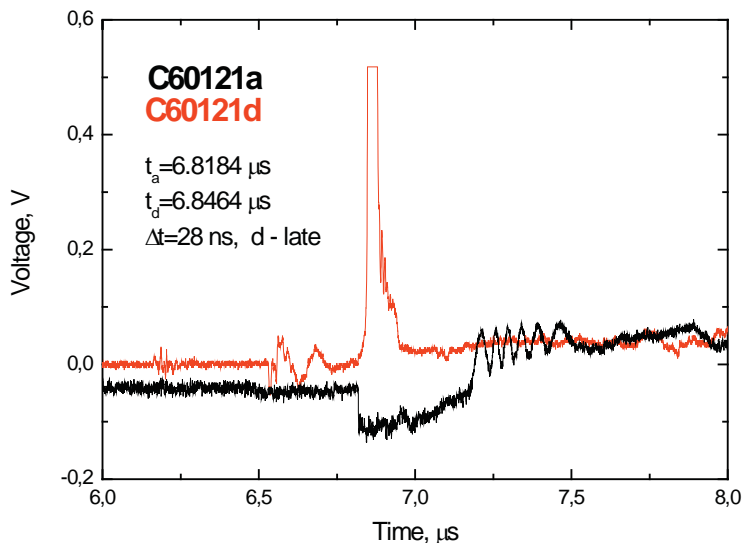


Рис. 5.10. Сигналы от поляризационного датчика (красный C60121d) и одного из каналов интерферометра VISAR (черный C60121a)

Как отмечалось, для регистрации момента времени входа ударной волны в образец используется поляризационный датчик (рис. 5.4). Поскольку сиг-

нал от этого датчика и сигнал от интерферометра VISAR (который позволяет не только определить скорость границы образец–водяное окно, но и фиксирует момент выхода волны из образца) идут по разным регистрирующим каналам, то необходимо установить связанное с этим возможное временное рассогласование этих сигналов. Поэтому в схеме, приведенной на рис. 5.4а, на границе экрана с окном устанавливался кольцеобразный поляризационный датчик с внутренним диаметром 30 мм и наружным 40 мм, сигнал от которого регистрировался наряду с интерферограммами. Результаты одного из измерений приведены на рис. 5.10. Красным цветом обозначен сигнал от поляризационного датчика С60121d, а черным от одного из каналов интерферометра VISAR (С60121а). Резкий передний фронт поляризационного сигнала отстает от интерферометрического на 28 нс. Эту поправку необходимо учитывать, если характерное время прохождения ударной волны по образцу порядка 100 нс, но в проведенных экспериментах с ТМ время распространения волны превышало 1 мкс, поэтому измеренное временное рассогласование не вносило заметной погрешности в определение скорости ударной волны.

5.2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕТОДИКА РЕГИСТРАЦИИ УДАРНОЙ АДИАБАТЫ ТМ

Схема экспериментов по исследованию ударной адиабаты ТМ приведена на рис. 5.4. Скорость распространения ударной волны по образцу измерялась по разности времен между моментами выхода волны из образца (сигнал с интерферометра VISAR) и моментом входа в образец (сигнал от поляризационного датчика). Массовая скорость определялась в результате измерения скорости границы образец–водяное окно интерферометром, принцип работы которого изложен в следующем разделе.

Лазерный интерферометр VISAR

Регистрация волновых профилей осуществлялась лазерным интерферометром VISAR. Зондирующее излучение отражалось от алюминиевой фольги, отделяющей ТМ от воздуха либо от водяного окна. Применение лазерных интерферометров для измерений скорости вещества в экспериментах с ударными волнами основано на использовании эффекта Доплера. Так как при скорости движения отражающей поверхности 20–2000 м/с эффект мал (изменение длины волны излучения составляет 10^{-3} – 10^{-2} Å), то для его фиксации используются двухлучевые или многолучевые интерферометры. При этом измерения принимают дифференциальный характер, что повышает их точность. Высокое пространственное разрешение лазерных методов обеспечивается тем, что зондирующее излучение фокусируется на исследуемом образце в пятно 0.1 мм.

На рис. 5.11 приведена схема лазерного доплеровского измерителя скорости VISAR. Излучение лазера фокусируется линзой на поверхность образца. Отраженный свет собирается той же линзой в параллельный пучок и направляется в интерферометр. После сужения на входном телескопе пучок

отраженного света расщепляется светоделителем (50/50) на два луча равной интенсивности. Светоделитель и стопроцентные концевые зеркала (З1 и З2) составляют оптически симметричный интерферометр. В одно из плеч интерферометра введена стеклянная линия задержки (ЛЗ), вследствие чего время двукратного прохождения света в этом плече больше, чем в противоположном, на величину, где l – длина линии задержки, n – показатель преломления, c – скорость света в вакууме.

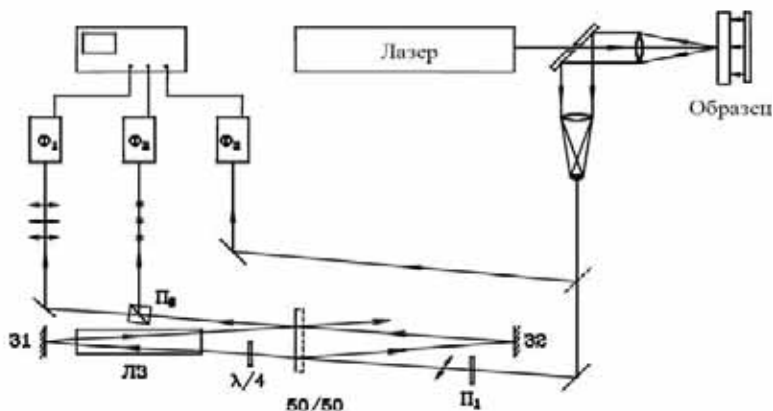


Рис. 5.11. Схема лазерного интерферометра VISAR

После отражения от концевых зеркал пучки света возвращаются на светоделитель, где и происходит их интерференция. Вследствие оптической симметрии интерферометра пространственная когерентность анализируемого излучения не требуется, и хороший интерференционный контраст получается даже при работе со светом, отраженным от рассеивающей, шероховатой поверхности, когда входящий в интерферометр пучок имеет пятнистую поперечную структуру.

Текущее значение монотонно изменяющейся скорости, отражающей поверхности $U(t)$, определяется по числу зафиксированных фотоприемниками биений интенсивности света $N(t)$:

где λ – длина волны зондирующего излучения, n – показатель преломления, δ – поправка на дисперсию света в блоке задержки, $\Delta\nu/\nu_0$ – частотная коррекция, которую необходимо учитывать в том случае, если зондирующее излучение проходит прозрачную среду (окно), меняющую при ударно-волновом сжатии свои оптические свойства.

Для определения направления изменения скорости в интерферометре предусмотрена система поляризационного кодирования, позволяющая определить направление изменения скорости в любой момент времени, включающая поляризатор света (Π_1), четвертьволновую пластинку ($\lambda/4$) и поляризационный светоделитель (Π_2). Благодаря контролю интенсивности попадающего в интерферометр света и системе поляризационного кодирования значения скорости отражающей поверхности однозначно определяются в каждый момент времени.

В качестве генератора зондирующего излучения использовался аргоновый лазер с мощностью непрерывного излучения на длине волны 514.5 нм до 1 Вт. Линия задержки в интерферометре представляет собой блок стекла ТФ1 либо К8 длиной от 100 до 300 мм, что позволяет изменять постоянную интерферометра (изменение скорости на одно биение) от 80 м/с до 305 м/с. В качестве фотоприемников излучения (Φ_1 , Φ_2 , Φ_3) используются быстродействующие фотоумножители РОД-4 с временным разрешением 1 нс. Сигналы фотоумножителей регистрируются цифровым осциллографом Tektronix TDS 7004 с полосой пропускания 500 МГц.

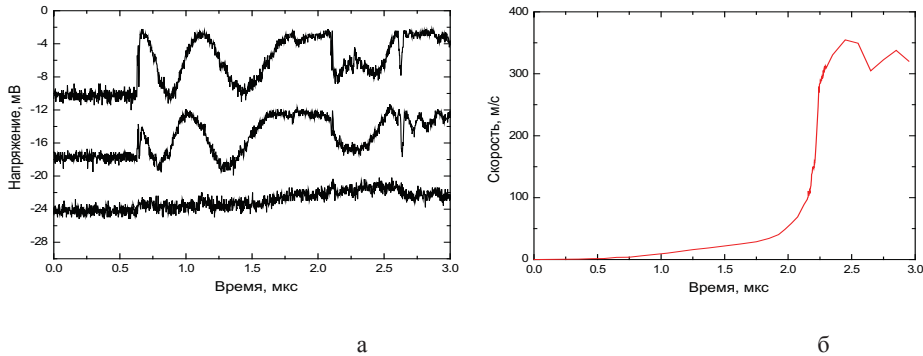


Рис. 5.12. Интерферограммы (а) и профиль скорости (б), полученный в результате их обработки

Типичные интерферограммы приведены на рис. 5.12а. Два верхних луча фиксируют изменение интенсивности интерференционной картины, причем верхний луч отстает по фазе примерно на 90° . Третий, самый нижний луч, фиксирует общее изменение интенсивности отраженного света. Одновременная обработка трех осциллограмм с применением ЭВМ позволяет однозначно получать профиль скорости с погрешностью не хуже 5–10 м/с на любом уровне скорости. Результат обработки интерферограмм, приведенных на рис. 5.12а, показан на рис. 5.12б. Временное разрешение методики составляет 2–3 нс.

Определение скорости ударной волны

Для регистрации момента времени входа ударной волны в образец использовался поляризационный датчик. Второй меткой времени являлся сигнал от интерферометра VISAR, который позволяет не только определить массовую скорость, но и фиксирует момент выхода волны из образца. На рис. 5.13 приведены осциллограммы с сигналами от ионизационного датчика и одного из каналов интерферометра для образца, которые позволяют определить время прохождения ударной волны по образцу Δt . Поскольку толщина образца известна, то это позволяет определить скорость ударной волны D . Точность определения D связана в основном с некоторой неопределенностью срабатывания датчиков, фиксирующих момент входа ударной волны в образец, поэтому величина Δt , а значит и D находятся обычно с точностью около $\pm 2.5\%$.

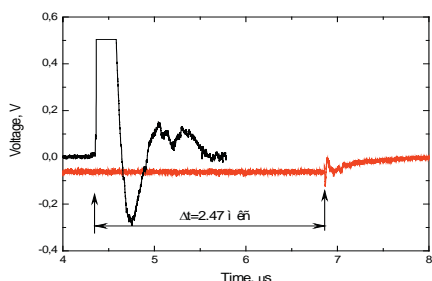


Рис. 5.14а. Сигналы поляризационного датчика (черный цвет) и одного из каналов интерферометра (красный цвет)



Рис. 5.14б Часть экспериментальной сборки с образцом. 1 – образец, $D = 55.5$ мм, $h = 15$ мм; 2 – алюминиевая фольга 200 мкм; 3 – алюминиевый экран диаметром 120 мм и толщиной 4 мм; 4 – кювета для воды

На рис. 5.14 представлена фотография узла сборки, где образец ТМ заменен парафиновым образцом (1). Для отражения лазерного луча использовалась алюминиевая фольга (2) толщиной 7 мкм и диаметром 20 мм. Образец располагался на алюминиевом (3) или медном экране, через который в него входила ударная волна, формирующаяся после соударения ударника с экраном. Между образцом и экраном располагался поляризационный датчик толщиной не более 100 мкм и диаметром 20 мм, с помощью которого фиксировался момент входа ударной волны в образец. За образцом располагалась кювета (4), которая при проведении опыта заполнялась водой.

Схема реальной кюветы с ТМ, которая представляла собой исследуемый образец (образец 1 на рис. 5.14), приведена на рис. 5.15. Объем, в который заливалось ТМ, был ограничен стальным кольцом 4 с отверстием 5. С одной стороны кольцо закрывалось алюминиевым либо медным экраном 1, через который в образец входила ударная волна. С другой стороны – алюминиевым экраном 2 с отверстием, которое заклеивалось 7-микронной алюминиевой фольгой 3, служащей для отражения зондирующего лазерного луча VISAR.

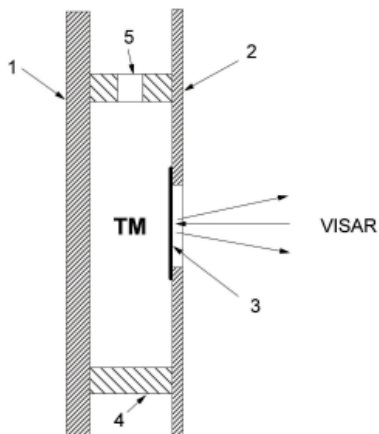


Рис. 5.15. Схема кюветы с ТМ

Полностью экспериментальная сборка с использованием взрывного метательного устройства, разгоняющего 4 мм алюминиевый ударник до скорости 1.46 км/с, показана на рис. 5.16. На сборке видны четыре медных провода: два вывода, наклеенные на плосковолновой генератор, служат для запуска осциллографа, а два других являются контактами поляризационного датчика. Сборка располагалась во взрывной камере, в которую заводился лазерный луч и все необходимые кабели. Максимальное количество взрывчатого вещества, которое можно использовать в камере, составляет 1 кг тротила.

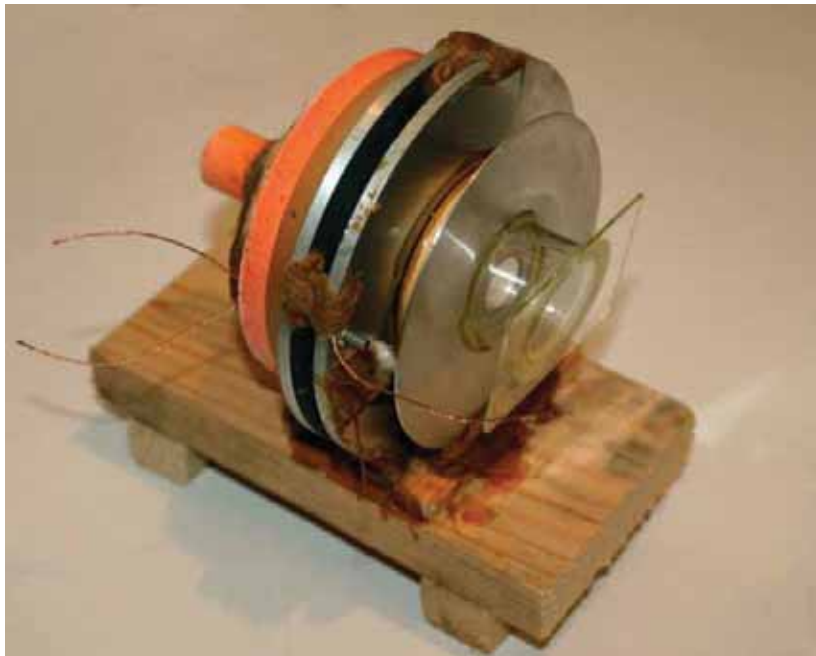


Рис. 5.16. Экспериментальная сборка с применением взрывного метательного устройства, показанного на рис. 5.7а

5.3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО УДАРНОЙ СЖИМАЕМОСТИ ТМ

Эксперименты по исследованию ударной адиабаты ТМ при давлении ниже 0.1 ГПа были проведены по схеме, показанной на рис. 5.17. Толщина слоя воды была равна 150 мм. Для еще большего уменьшения амплитуды ударной волны между образцом и плексигласовым экраном помещалась алюминиевая пластина толщиной 10 мм. Из-за относительно высокой жесткости алюминия это позволило почти в два раза снизить давление в ТМ.

Предварительно были проведены измерения скорости свободной поверхности алюминиевого экрана. Результат измерения показан на рис. 5.17 черной линией. Среднее значение скорости в течение первых нескольких микросекунд составляет примерно 15 м/с. Во второй серии экспериментов измерялась скорость свободной поверхности ТМ, показанная на рис. 5.17 красной линией. Среднее ее значение равно 25 м/с. Поскольку профили скорости являются осциллирующими, то точность определения не превышала 5 м/с.

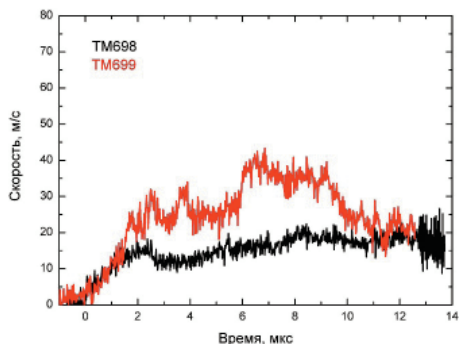


Рис. 5.17. Профили скорости свободной поверхности алюминиевого экрана (чёрная линия) и ТМ (красная линия)

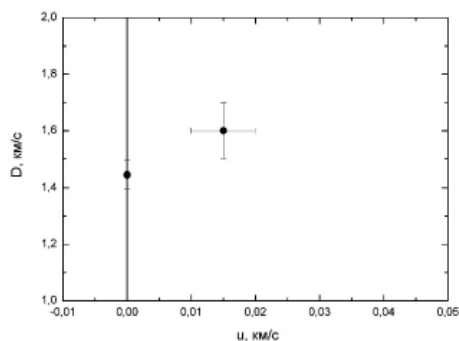


Рис. 5.18. Точки на ударной адиабате ТМ при давлении ниже 0.1 ГПа

Наряду с массовой скоростью была измерена скорость ударной волны в трансформаторном масле. Основная погрешность при этом связана с большой шириной фронта ударной волны. Как видно из рис. 5.8, она составляет примерно 2 мкс. Поэтому при определении времени прохождения импульса по образцу ТМ использовалась точка, лежащая на середине «скачка». Найденная таким образом скорость ударной волны равна 1.6 км/с с точностью до ± 0.1 км/с. Полученная точка соответствует давлению в ТМ 0.02 ГПа. На рис. 5.18 приведена измеренная точка на ударной адиабате ТМ в координатах скорость ударной волны D – массовая скорость u . Там же показано значение скорости звука, измеренное при атмосферном давлении.

Эксперименты по исследованию ударной адиабаты ТМ в интервале давлений 0.1–10.0 ГПа были проведены по схеме, показанной на рис. 5.4. Профили массовой скорости, измеренные на границе ТМ–водяное окно, и соответствующие им сигналы поляризационных датчиков приведены на рис. 5.19–5.28.

На рис. 5.19, 5.20 толщина образца составляла 10 мм. Скорость алюминиевого ударника толщиной 7 мм была равна 1.13 км/с. Ударная волна входила в образец через медный экран. Благодаря большой толщине алюминиевого ударника тыльная волна разгрузки не приводит к затуханию амплитуды импульса сжатия, и, как видно на рис. 5.19, после ударного скачка в течение примерно 0.7 мкс фиксируется постоянный уровень скорости. Точность определения скорости границы в данном случае высока

и составляет ± 5 м/с. Сигнал поляризационного датчика приведен на рис. 5.20. Точность определения скорости ударной волны составляет примерно 1 %. Полученная точка на ударной адиабате соответствует давлению в ТМ 1.71 ГПа.

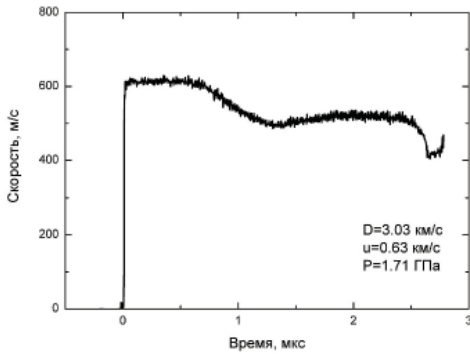


Рис. 5.19. Профили скорости границы ТМ с водяным окном

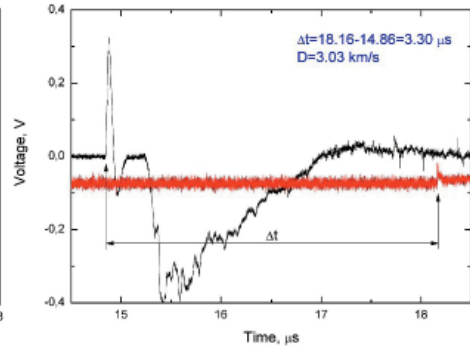


Рис. 5.20. Сигналы поляризационного датчика (черный цвет) и интерферометра (красный цвет)

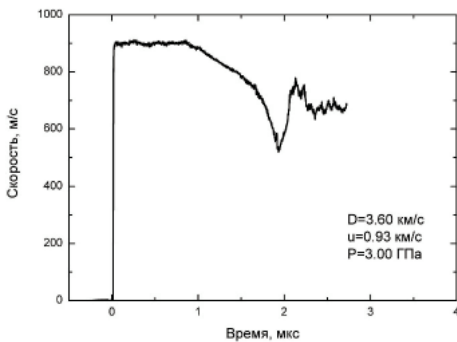


Рис. 5.21. Профили скорости границы ТМ с водяным окном

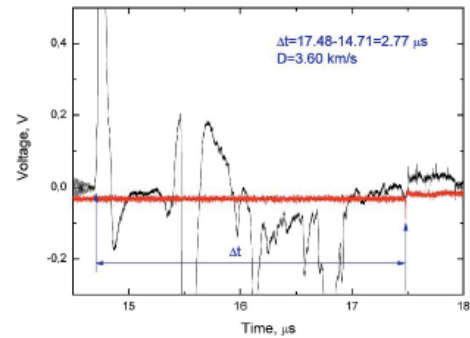


Рис. 5.22. Сигналы поляризационного датчика (черный цвет) и интерферометра (красный цвет)

Результат аналогичного эксперимента с применением алюминиевого экрана показан на рис. 5.21, 5.22. Полученная точка соответствует давлению в ТМ 4.0 ГПа.

Результаты экспериментов по исследованию ударной адиабаты ТМ с использованием алюминиевого ударника толщиной 4 мм, метаемого со скоростью 1.46 км/с, показаны на рис. 5.23, 5.24. Толщина образца составляла 8 мм. Из-за малой толщины алюминиевого ударника тыльная волна разгрузки практически догнала фронт ударной волны, но затухание амплитуды импульса сжатия еще не началось, и, как видно на рис. 5.23, после ударного скачка в течение примерно 0.1 мкс фиксируется постоянный уровень скорости.

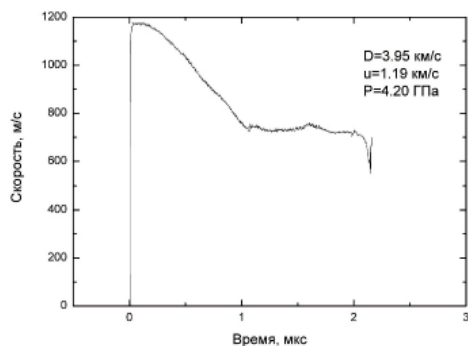


Рис. 5.24. Профили скорости границы ТМ с водяным окном

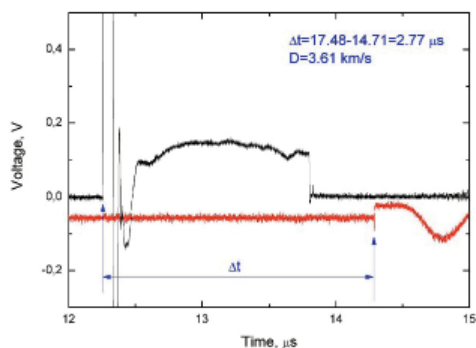


Рис. 5.24. Сигналы поляризационного датчика (черный цвет) и интерферометра (красный цвет)

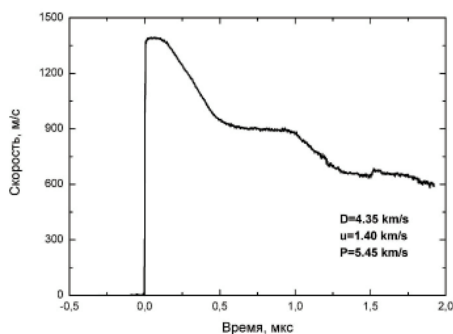


Рис. 5.25. Профили скорости границы ТМ с водяным окном

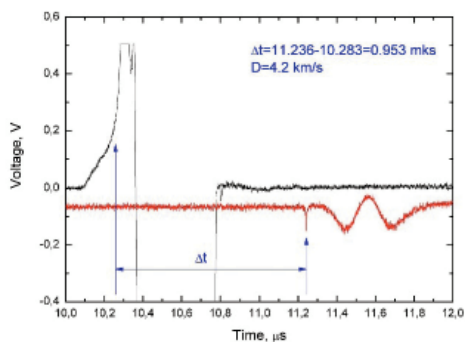


Рис. 5.26. Сигналы поляризационного датчика (черный цвет) и интерферометра (красный цвет)

Давление в ТМ в опыте, результаты которого приведены на рис. 5.23, 5.24, составляет 4.20 ГПа. Для получения более высоких параметров ударных волн использовалась описанная выше схема метания алюминиевых пластин толщиной 2 мм. Соответствующий профиль массовой скорости, измеренный на границе ТМ–водяное окно, показан на рис. 5.25. Толщина образца составляла 4 мм. Как и в предыдущем опыте, волна разгрузки практически догнала фронт ударной волны, но здесь также затухание амплитуды импульса сжатия еще не началось, и, как видно на рис. 5.25, после ударного скачка в течение примерно 0.1 мкс фиксируется постоянный уровень скорости. Давление ударного сжатия ТМ в данном опыте составляло 5.45 ГПа.

Эксперименты по исследованию ударной адиабаты ТМ в интервале давлений 6.0–10.0 ГПа были проведены по схеме, показанной на рис. 5.8. Профиль массовой скорости, измеренный на границе ТМ–водяное окно, приведен на рис. 5.27. Толщина образца составляла 10 мм. Благодаря большой толщине алюминиевого ударника тыльная волна разгрузки не приводит к затуханию амплитуды импульса сжатия, и, как видно на рис. 5.27, после

ударного скачка в течение примерно 1.4 мкс скорость постоянна, что позволяет использовать образцы толщиной 10–15 мм.

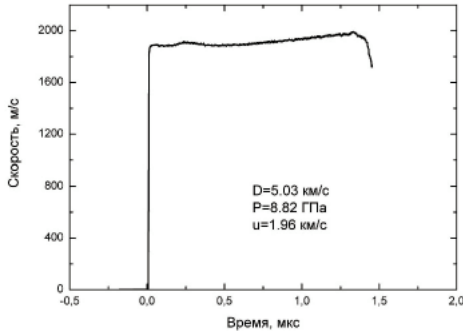


Рис. 5.27. Профили скорости границы ТМ с водяным окном

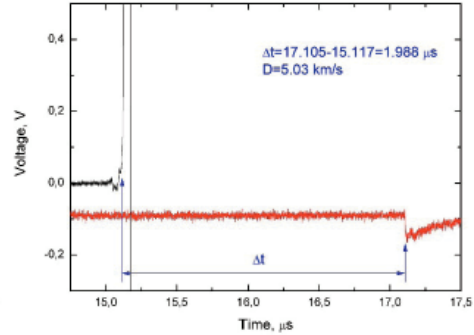


Рис. 5.28. Сигналы поляризационного датчика (черный цвет) и интерферометра (красный цвет)

Полученные в результате проведенных экспериментов точки на ударной адиабате приведены на рис. 5.29 в координатах скорость ударной волны D – массовая скорость u .

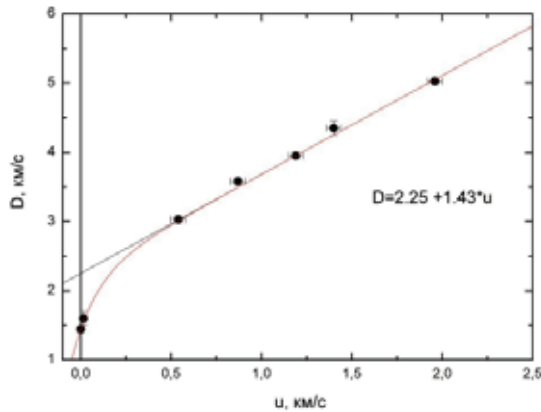


Рис. 5.29. Ударная адиабата ТМ при давлении ниже 10.0 ГПа

Экспериментальные данные при давлении выше 1.7 ГПа (соответствующее значение массовой скорости превышает 0.5 км/с) хорошо аппроксимируются линейной зависимостью скорости ударной волны от массовой скорости (черная линия на рис. 5.29):

$$D=2.25+1.43*u, \text{ км/с.} \quad (5.1)$$

Однако при низких давлениях ($u < 0.2$ км/с) зависимость (5.1) дает завышенные значения D , а первое слагаемое, равное 2.25 км/с, отличается от

скорости звука при атмосферном давлении на 40 %. Т.е. ударная адиабата ТМ в координатах $D-u$ является сильно нелинейной и в исследованном интервале давлений от 0 до 10 ГПа может быть описана зависимостью:

$$2.25 + 1.43 \cdot u - 0.81 \cdot \exp(-7.5 \cdot u), \text{ км/с.} \quad (5.2)$$

Зависимость (4.2) представлена на рис. 5.9 красной линией и, как видно, в пределах погрешности совпадает с экспериментальными данными.

5.4. УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА

Приступая к разработке математической модели высоковольтного пробоя и генерируемых им в трансформаторе ударноволновых процессов, авторы практически не имели данных об уравнении состояния трансформаторного масла (ТМ) при высоких давлениях и температурах. В результате построение уравнения состояния ТМ в интервале термодинамических параметров, обеспечивающих численный анализ пробоя и возможного разрушения трансформатора, было проведено по аналогии с такой наиболее изученной жидкостью, как вода, при использовании экспериментальных данных, полученных в процессе проводимых исследований [1].

Предварительные аналитические оценки и результаты экспериментов по динамическим процессам, развивающимся при импульсном дуговом разряде [2], показывают, что давление в ударных волнах, распространяющихся в конденсированной фазе, нигде не превосходит 1000 атм. и в большинстве случаев лежит в интервале 100–200 атм., а температура в зоне дуги, где она максимальна, не превосходит 5000 °К. Согласно [3], при таких давлениях в ударных волнах молекулярная структура органических жидкостей качественно не меняется и поведение ударных адиабат жидкостей одного класса сходно. С точки зрения физики ударных волн достигаемые давления не столь велики, и поведение среды в области сжатия в значительной степени определяется акустическими характеристиками. Сравнение при нормальных условиях характеристик ТМ и воды показывает, что они достаточно близки (см. таблицу 5.1).

Таблица 5.1. Теплофизические свойства воды и трансформаторного масла при нормальных условиях

Параметр	вода	трансформаторное масло
Плотность, кг/м ³	1000.0	895.0
Скорость звука, м/с	1500	1450
Акустический импеданс, 10 ⁶ кг/м ² с	1.5·10 ⁶	1.3·10 ⁶

Это делает возможным провести построение уравнения состояния ТМ в области сжатия, исходя из уравнения состояния воды. При этом, учитывая малое количество конкретной информации о динамических свойствах ТМ, достаточно ограничиться уравнением, дающим не детальное, но удовлетво-

рительное описание с помощью единого уравнения состояния поведения вещества в достаточно большом диапазоне температур и плотностей. В качестве такого уравнения состояния выберем уравнение Кузнецова, показавшее хорошие результаты при решении широкого класса задач интенсивного динамического воздействия [4, 5].

Как и в большинстве работ по конденсированным средам, в [4] уравнение состояния воды выбрано в форме Ми–Грюнайзена [5], содержащей упругую $p_x(\rho)$ и тепловую $p_t(\rho, T)$ составляющие:

$$p(\rho, T) = p_x(\rho) + p_t(\rho, T). \quad (5.3)$$

Аналогичным образом выделяются упругая $\varepsilon_x(\rho)$ и тепловая $\varepsilon_t(\rho, T)$ составляющие внутренней энергии:

$$\varepsilon_t(\rho, T) = \varepsilon_x(\rho) + \varepsilon_t(\rho, T). \quad (5.4)$$

При этом:

$$p_t(\rho, T) = G\rho \varepsilon_t(\rho, T) / \mu, \quad (5.5)$$

$$\varepsilon_t(\rho, T) = c_v T, \quad (5.6)$$

где μ – молекулярная масса, $G=Rf/c_v$ – коэффициент Грюнайзена, R – газовая постоянная, c_v – теплоемкость при постоянном объеме, $f(\rho)$ – эмпирическая интерполяционная функция, обеспечивающая переход от газовой к конденсированной фазе.

В области сжатия $\rho > 1$ г/см³ упругая составляющая давления определялась на основе обработки экспериментальных данных по ударной адиабате p_H и с учетом поправки $f(\rho)$, учитывающей зависимость коэффициента Грюнайзена от плотности. Таким образом, для воды эмпирическое уравнение в области сжатия имеет вид:

при $1 \leq \rho \leq 2,3$ г/см³

$$p = p_H (1 - 0,012\rho^2 f(\rho)) + 4,7\rho f(\rho)(T - 273), \quad (5.7)$$

$$p_H = \frac{3050(\rho^{7,3} - 1)}{1 + 0,7(\rho - 1)^4}, \text{ для } 0 < p \leq 4,2 \times 10^5 \text{ атм.} \quad (5.8)$$

Интерполяция уравнения для давления в область разгрузки приводит к уравнению состояния:

при $\rho < 1$ г/см³

$$p = \xi^4 - 470\rho f(\rho)\xi + 4,7\rho f(\rho)(T - 273). \quad (5.9)$$

В уравнениях (5.4), (5.6)

$$f(\rho) = \frac{1 + 3,5\rho - 2\rho^2 + 7,27\rho^6}{1 + 1,09\rho^6} \quad (5.10)$$

$$\xi = 6,6(1-\rho)^{0,57} \rho^{0,25} \quad \text{при } 0 < \rho < 0,8 \text{ г/см}^3$$

$$\xi = 10(1-\rho) + 66(1-\rho)^2 - 270(1-\rho)^3 \quad \text{при } 0,8 < \rho < 1,0 \text{ г/см}^4.$$

Уравнения (5.5), (5.7) позволяют определить давление воды по ее температуре и плотности в диапазоне термодинамических параметров

$$273^\circ < T < 5000 \div 10000^\circ \text{ К},$$

$$0 < \rho < 2,3 \text{ г/см}^4.$$

Сравнение с имеющимися экспериментальными данными показывает, что во всей области определения уравнения Кузнецова относительная ошибка по давлению не превосходит 20 % за исключением области вблизи нормальных параметров ($\rho = 1 \text{ г/см}^3$, $T = 300 \text{ }^\circ\text{К}$), где ошибка в давлении достигает $\Delta p = 500 \text{ атм}$. Имеющее место расхождение, однако, мало сказывается на расчет ударно-волновых процессов и может быть сглажено вычитанием из полученного по формулам (5.5), (5.7) давления величины Δp .

Выражение для внутренней энергии в модели Кузнецова было получено Шуршаловым Л.В. [5] и задается формулой:

$$\tilde{\varepsilon} = 0,1010 \cdot 10^5 \tau + 0,63 \cdot 10^5 \frac{(1 - 1/R)(0,71 - 1/R)}{(1/R)^{4/3}} - (1 - 2 \operatorname{Re} xp(-R^2)) + const, \quad (5.11)$$

где $\tilde{\varepsilon} = \varepsilon \rho_0 / p_0$; $\tau = T / T_0$; $R = \rho / \rho_0$; $p_0 = 1 \text{ атм}$; $\rho_0 = 1 \text{ г/см}^3$; $T_0 = 273 \text{ }^\circ\text{К}$.

Уравнение (5.9) определено в интервале параметров, соответствующих только области сжатия $1 \leq \rho \leq 2,3 \text{ г/см}^3$, $273^\circ < T < 6000 \text{ }^\circ\text{К}$. Таким образом, для получения полного уравнения состояния во всей области расчета давления по формулам (5.5), (5.7) формулу для внутренней энергии необходимо распространить на область ниже нормальной плотности.

В области $0 < \rho < 1,0 \text{ г/см}^3$ при расчете внутренней энергии в правой части уравнения (5.9) сохранялось только первое слагаемое. Множитель перед τ рассматривался как удельная теплоемкость при постоянном объеме c_v , умноженная на 273°К . В уравнении (5.9) в интервале $\rho_{cr} < \rho < \rho_0$ (ρ_{cr} – критическая плотность воды, $\rho_{cr} = 320 \text{ кг/м}^3$) задавалась теплоемкость c_v жидкой фазы воды. При $\rho \leq \rho_{cr}$ за теплоемкость принималась теплоемкость газовой фазы. В этом случае учитывалась зависимость теплоемкости от температуры. При $T \leq 10000^\circ \text{ К}$ теплоемкость вычислялась путем интерполяции полиномами пятого порядка табличных данных [6]:

$$c_v = R (A_1 + A_2 t + A_3 t^2 + A_4 t^3 + A_5 t^4 - 1), \quad (5.12)$$

где $t = T/1000 \text{ К}$, R – газовая постоянная, размерность теплоемкости – Дж/(кг·град), значения коэффициентов A_i приведены в таблице 5.2.

Таблица 5.2. Значение интерполяционных коэффициентов для расчета теплоемкости газовой фазы

	$300^{\circ} \leq T \leq 1000^{\circ} \text{K}$	$1000^{\circ} \leq T \leq 5000^{\circ} \text{K}$
A_1	4.0701	2.7168
A_2	$-0.11084 \cdot 10^{-2}$	$0.29451 \cdot 10^{-2}$
A_3	$0.41521 \cdot 10^{-5}$	$-0.80224 \cdot 10^{-6}$
A_4	$-0.29637 \cdot 10^{-8}$	$0.10227 \cdot 10^{-9}$
A_5	$0.80702 \cdot 10^{-12}$	$-0.48472 \cdot 10^{-14}$

При $T > 10000^{\circ}$ учитывалось уменьшение коэффициента теплоемкости:

$$c_v = (c_v^* - c_{pl}) \exp[-(T - 10000) / 10000] + c_{pl} \quad (5.13)$$

$$\xi = 6,6(1 - \rho)^{0,57} \rho^{0,25},$$

где $c_{pl} = \frac{3}{2} R$ – теплоемкость полностью ионизованной плазмы, c_v^* – теплоемкость при температуре 10000°K , R – газовая постоянная, отнесенная к средней массе ионов водородно-кислородной смеси.

Для численного моделирования течений трансформаторного масла была проведена модификация уравнения Кузнецова с целью учета основных особенностей, отличающих поведение масла от воды.

При выводе уравнения давления для ТМ предполагалось, что коэффициент Грюнайзена теперь следует увеличить, т.к. теплоемкость масла существенно меньше теплоемкости воды. С этой целью тепловая составляющая в уравнениях (5.5), (5.7) была помножена на интерполяционное соотношение

$$\Phi = \left(k - (k - 1) \exp\left(-\frac{T - T^*}{\sigma}\right) \right), \quad (5.14)$$

где k , σ – эмпирические константы. Сопоставление с результатами экспериментов по трансформаторному маслу [1] и оценка концентрации числа частиц при диссоциации дают:

$$T^* = 2000^{\circ} \text{K}; k = 9.0; \sigma = 1000.0. \quad (5.15)$$

Так как при выводе уравнений для давления плотность нормировалась на нормальную, в уравнениях (5.7)–(5.9) под плотностью ρ следует теперь понимать:

$$\bar{\rho} = \rho / \rho_0; \quad (5.16)$$

где ρ_0 – нормальная плотность ТМ.

При учете энергии по формуле (5.9) при плотностях, больших критической плотности трансформаторного масла ($\rho_{cr} = 230 \text{кг/м}^3$), за множитель

перед τ принимается, как это было сделано для воды, произведение теплоемкости трансформаторного масла $c_v = 2040.0$ Дж/кг $^{\circ}$ К на T_0 .

При расчете внутренней энергии при $\rho \leq \rho_{cr}$ холодная составляющая внутренней энергии обращалась в ноль, а тепловая задавалась интерполяционной формулой на основании результатов обработки термодинамических характеристик продуктов разложения ТМ, полученных из [7] и специально проведенных расчетов по программе ИВТАН-ТЕРМО:

$$\varepsilon_T = \begin{cases} AX + BX^2, & T < 1000 \text{ }^{\circ}\text{K} \\ CX + D, & 1000 \leq T < 2000 \text{ }^{\circ}\text{K} \\ EX + F, & 2000 \leq T. \end{cases} \quad (5.17)$$

Здесь $X = (T - 298.15^{\circ})$, E имеет размерность Дж/кг.

Входящие в уравнение (5.15) константы представлены ниже.

Окончательно уравнение состояния ТМ, использованное при численном моделировании высоковольтного пробоя в трансформаторе, имеет вид:

Уравнение для расчета давления по температуре и плотности трансформаторного масла в широком диапазоне термодинамических параметров:

при $\rho_0 \leq \rho$

$$p/p^* = p_H \left(1 - 0.012 \bar{\rho}^2 f(\bar{\rho}) + 1.5 \bar{\rho} f(\bar{\rho}) (T - T_0) \left(\kappa - (\kappa - 1) \exp\left(-\frac{T - T^*}{\sigma}\right) \right) \right) \quad (5.18)$$

при $\rho < \rho_0$

$$p/p^* = \xi^4 - 470 \bar{\rho} f(\bar{\rho}) \xi + 1.5 \bar{\rho} f(\bar{\rho}) (T - T_0) \left(\kappa - (\kappa - 1) \exp\left(-\frac{T - T^*}{\sigma}\right) \right). \quad (5.19)$$

В уравнениях (5.18), (5.19):

$$f(\bar{\rho}) = \frac{1 + 3.5\bar{\rho} - 2\bar{\rho}^2 + 7.27\bar{\rho}^6}{1 + 1.09\bar{\rho}^6}$$

$$\xi = 6.6(1 - \bar{\rho})^{0.57} \bar{\rho}^{0.25} \quad \text{при } 0 < \bar{\rho} < 0.8$$

$$\xi = 10(1 - \bar{\rho}) + 66(1 - \bar{\rho})^2 - 270(1 - \bar{\rho})^3 \quad \text{при } 0.8 < \bar{\rho} < 1.0.$$

Параметр p_H в уравнении (5.16):

$$p_H = \frac{3050(\bar{\rho}^{7.3} - 1)}{1 + 0.7(\bar{\rho} - 1)^4} \quad 0 < p \leq 2 \times 10^4 \text{ атм.}$$

Уравнение для расчета внутренней энергии:

$$\tilde{\varepsilon} = 20.04 \cdot T + 0.63 \cdot 10^5 \frac{\left(1 - \frac{1}{\bar{\rho}}\right) \left(0.71 - \frac{1}{\bar{\rho}}\right)}{\left(\frac{1}{\bar{\rho}}\right)^{4/3}} \left(1 - 2\bar{\rho} \exp(-\bar{\rho}^2)\right) \text{ при } \rho_0 \leq \rho \quad (5.20)$$

$$\tilde{\varepsilon} = 20.04 \cdot T \text{ при } \rho_{cr} < \rho < \rho_0, \quad (5.21)$$

где $\tilde{\varepsilon} = \varepsilon \frac{\rho_1}{p_1}$; $p_1 = 10^5$ Па; $\rho_1 = 1000$ кг/м³.

В продуктах разложения трансформаторного масла

$$\varepsilon = \begin{cases} AX + BX^2, & T < 1000\text{K} \\ CX + D, & 1000 \leq T \leq 2000\text{K} \text{ при } \rho < \rho_{cr} \\ EX + F, & 2000 \leq T, \text{ K.} \end{cases} \quad (5.22)$$

Здесь $X = (T - 298.15^0)$, $A = 1678.56$, $B = 1.4756$, $C = 4062.7$, $D = -946437.8$, $E = 23584.0$, $F = -34168762.21$.

Подгоночные параметры в уравнениях (5.3), (5.4):

$T^* = 300$ °К; $k = 9.0$; $\sigma = 1000.0$.

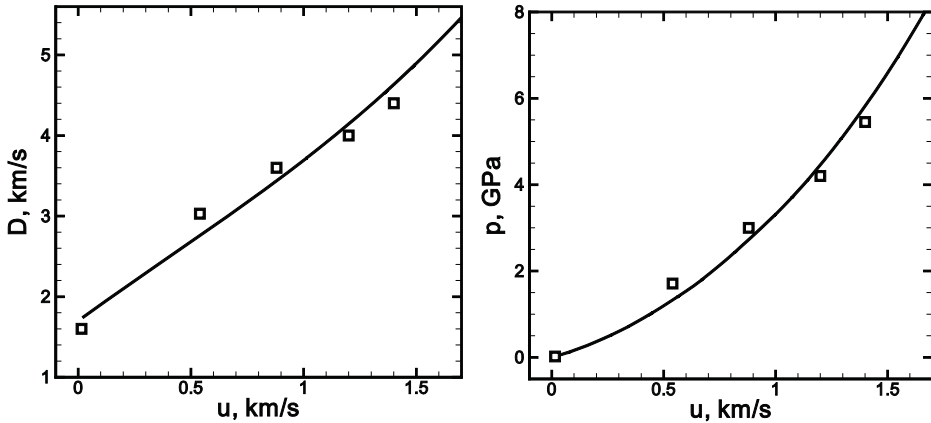


Рис. 5.30. Ударные адиабаты ТМ в координатах скорость ударной волны (D) – массовая скорость (u) (слева) и давление (p) – массовая скорость (u) (справа). Сплошные линии – расчет; квадраты – результаты экспериментов

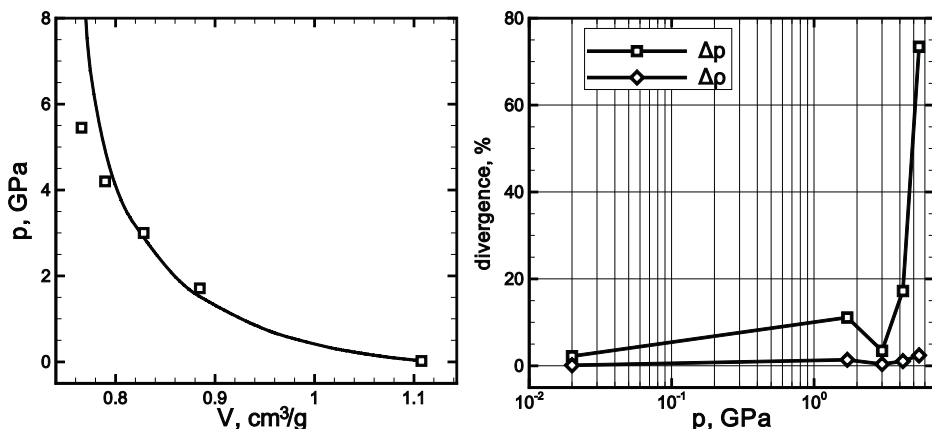


Рис. 5.31. Ударная адиабата в координатах давление (p) – удельный объем (V) (слева). Относительные погрешности в расчете давления и плотности в экспериментальных точках (справа)

Для оценки точности построенного уравнения состояния ТМ на рис. 5.30, 5.31 дано сравнение ударных адиабат, рассчитанных по уравнениям (5.18)–(5.20) и полученных в экспериментах [1]. Видно, что предложенное уравнение состояния достаточно хорошо описывает изменение параметров на ударной волне в широком диапазоне давлений (значительно больших, чем могут возникать в условиях высоковольтного пробоя трансформатора).

На рис. 5.3 представлены для сравнения ход изотерм модифицированного уравнения состояния Кузнецова и разработанного уравнения для трансформаторного масла. Видно, что использованный подход не изменил качественную картину нарастания давления с ростом плотности и температуры, но поднял значения давления при высоких температурах.

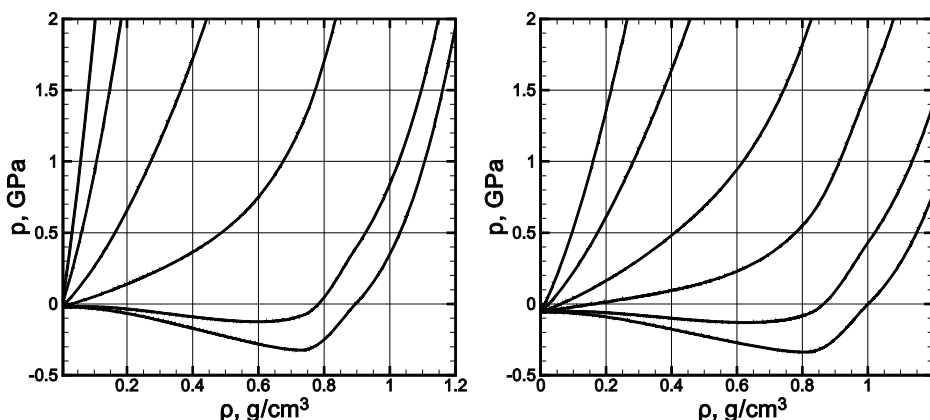


Рис. 5.32. Сравнение модифицированных уравнений состояния Кузнецова для масла (слева) и для воды (справа). В переменных давление–плотность изображены изотермы 300, 500, 1000, 2000, 5000, 10000 К

Вязкость и теплопроводность трансформаторного масла

Трансформаторное масло является термовязкой жидкостью (обзор из Куликова).

Вследствие высоких температур среды в области пробоя роль теплопроводности на парообразование и динамические процессы в наиболее нагретой зоне не столь очевидна и требует дополнительного исследования. С этой целью ряд расчетов разогрева и динамики воды и трансформаторного масла под действием энерговложения, имитирующего высоковольтный пробой, был проведен Е.М. Апфельбаумом с учетом переноса тепла за счет теплопроводности. Входящий в уравнение энергии коэффициент теплопроводности задавался следующим образом:

Количественная оценка коэффициента теплопроводности трансформаторного масла получена, исходя из молекулярно-кинетической теории. Учитывая, что ТМ является жидким органическим диэлектриком, можно считать, что перенос тепла при температурах, меньших, чем температура диссоциации, осуществляется молекулами, из которых этот диэлектрик состоит. С требуемой для получения предварительных результатов точностью будем считать, что ТМ описывается химической формулой $C_{20}H_{42}$ (масса $m = 282$ а. е. м.). Нормальная плотность $\rho_0 = 0.86\text{--}0.89$ г/см³. Это соответствует числу молекул в единице объема $n = 1.9 \times 10^{20}$ 1/см³. Температура плавления или замерзания $T_m = 228$ °К (при нормальных условиях, т.е. при давлении $P = 1$ атм и плотности $\rho_0 = 0.86$ г/см³).

Для теоретического определения кинетических коэффициентов необходимо выбрать конкретный потенциал межмолекулярного взаимодействия. Известно, что углеводороды хорошо описываются потенциалом типа Букингема [8]. Кроме того, для многих углеводородов хорошо выполняются законы подобия, в частности, закон соответственных состояний. Будем считать, что этот закон справедлив и для ТМ. Тогда, исходя из параметров для потенциала Букингема для метана [8], мы можем получить характерную энергию и характерный радиус для расчета межмолекулярного потенциала ТМ. Соответствующие соотношения подобия дают:

$$\begin{aligned} r_0^{\text{TM}} &= 2.44 r_0^{\text{CH}_4} = 10.23 \text{ \AA} \\ \varepsilon^{\text{TM}} / k_B &= 2.5 \varepsilon^{\text{CH}_4} / k_B = 401.63 \text{ К.} \end{aligned} \quad (5.23)$$

Используя (4.21), получаем оценку критических параметров для ТМ: $T_{\text{crit}} = 477$ К, $\rho_{\text{crit}} = 0.195$ г/см³. Молекула ТМ начинает диссоциировать при температуре около тысячи градусов. Ионизация (отрыв электронов) наступает при еще больших температурах. Поэтому до температур в 2000–3000 °К можно считать, что ТМ представляет собой однокомпонентную систему с потенциалом Букингема. В принципе теплопроводность далее может быть рассчитана непосредственно методом молекулярной динамики. Однако такого рода расчеты весьма трудоемки и представляют собой самостоятельное научное исследование, поэтому на предварительном этапе целесообразно использовать оценочные формулы из [9]. В этом случае теплопроводность k выражается как:

$$\kappa \sim \sqrt{T} / \sigma(T), \quad (5.24)$$

где $\sigma(T)$ – это сечения рассеяния на используемом потенциале, в котором скорость заменена на среднеквадратичную. Для потенциала Букингема сечение столкновения можно оценить как [10]:

$$\sigma(T) \sim (r_0^{\text{TM}} + B/T^{1/6})^2. \quad (5.25)$$

В результате коэффициент теплопроводности записывается в виде:

$$\kappa = AT^{5/6} / (T^{1/6} + B_1)^2. \quad (5.26)$$

Для определения констант A и B_1 воспользуемся данными о коэффициенте теплопроводности из [11] (для масла $T \approx 1500$): при атмосферном давлении значения κ равны $\kappa(T = 293 \text{ }^\circ\text{K}) = 0.2881 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, $\kappa(T = 423 \text{ }^\circ\text{K}) = 0.111 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$. Это позволяет определить значение коэффициентов A и B_1 : $B_1 = -2.392$, $A = 8.69 \cdot 10^{-5}$. В результате имеем:

$$\kappa = \frac{8.69 \cdot 10^{-5} T^{5/6}}{(T^{1/6} - 2.392)^2} \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}), \quad [T] = \text{К}, \quad (5.27)$$

$$T = 293 - 3000 \text{ К}.$$

Отметим, что выражение (5.25) не зависит от плотности. Это обстоятельство подтверждается данными измерений [11]: при изменении давления в 400 раз по отношению к нормальному теплопроводность меняется на 8 %. Поэтому можно считать, что формула (5.25) может использоваться вплоть до начала диссоциации, т.е. до температур в 2000–3000 $^\circ\text{K}$. Для более высоких температур можно считать, что, во-первых, сложная молекула разваливается на более простое соединение, во-вторых, что появляются свободные электроны, которые будут рассеиваться, главным образом на нейтралах. Это рассеяние и будет давать главный вклад в теплопроводность. Таким образом, перенос энергии можно рассматривать в приближении лоренцевского газа. Взаимодействие электрон–нейтрал является поляризационным, т.е. убывает как $1/r^4$. Это дает постоянное сечение рассеивания. Взаимодействие электрон–ион является кулоновским. В этом случае сечение ведет себя как $1/E$. Поэтому коэффициент теплопроводности в области высоких температур представляется выражением [9]:

$$\kappa \sim \frac{n_e}{T^2} \left\langle \frac{uE(4T - E)}{(n_i \sigma_{ei}(u) + n_{\text{neutral}} \sigma_{e\text{-neutral}}(u))} \right\rangle, \quad E = m_e u^2 / 2,$$

$$\langle F(E) \rangle = \frac{\int_0^\infty F(E) e^{-E/T} \sqrt{E} de}{\int_0^\infty e^{-E/T} \sqrt{E} de}. \quad (5.28)$$

Выражение (5.26) можно аппроксимировать зависимостью:

$$\kappa = \frac{CT^{5/2}}{D + T^2} \quad (5.29)$$

Постоянные C , D определяются из условия равенства (5.27) и (5.29), а также их производных при $T = 3000$ °К. Это дает в (5.29) $C = 5.498 \times 10^{-4}$, $D = -1.1987 \times 10^6$. Окончательно получаем коэффициент теплопроводности в виде:

$$\kappa = \begin{cases} \frac{8.69 \cdot 10^{-5} T^{5/6}}{(T^{1/6} - 2.392)^2}, & T = 293 - 3000 \text{ К} \\ \frac{5.498 \cdot 10^{-4} \cdot T^{5/2}}{T^2 - 1.1987 \cdot 10^{-4}}, & T > 3000 \text{ К} \end{cases} \quad (5.30)$$

$[\kappa] = \text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}), \quad [T] = \text{К}.$

Обозначения

p – давление в среде, Па

p_0 – нормальное давление, (10^5 Па)

T – температура, К

T_0 – нормальная температура, К (300 К)

ρ – плотность среды, $\text{кг}/\text{м}^3$

ρ_0 – плотность при нормальных условиях, $\text{кг}/\text{м}^3$ (860.0–895.0 $\text{кг}/\text{м}^3$)

$$\bar{\rho} = \rho / \rho_0$$

$\rho_{\text{cr}} = 230$ – плотность в критической точке, $\text{кг}/\text{м}^3$

ε – удельная внутренняя энергия, Дж/кг

$p^* = 98068.0$ – нормировочный множитель в уравнениях (5.1), (5.2)

Литература

1. Отчёт о научно-исследовательской работе. Экспериментальное исследование ударной сжимаемости трансформаторного масла ТМ в интервале давлений 0.01–0.1 ГПа. Черногловка: Институт проблем химической физики РАН, 2010.

2. Отчет о научно-исследовательской работе. Совершенствование взрывобезопасности высоковольтного маслонаполненного электротехнического оборудования ОАО «ФСК ЕЭС». Этап 1. М.: Объединённый институт высоких температур РАН, 2008.

3. Shock compression chemistry in materials synthesis and processing. Report of the Committee on shock compression chemistry in materials synthesis and processing. Washington: National Academy Press, 1984.

4. Кузнецов Н.М. Уравнение состояния и теплоемкость воды в широком диапазоне термодинамических параметров// ПМТФ. 1961. №1. С. 112–120.

5. Баум Ф.А., Орленко Л.П., Станюкович К.П. и др. Физика взрыва. М.: Наука. 1975.

6. *Hilsenrath J.* Tables of thermodynamic and transport properties. London: Pergamon Press. 1960.

7. Белов Г.В., Иориш В.С., Юнгман В.С. Моделирование равновесных состояний термодинамических систем с использованием IVTANTERMO для Windows // Теплофизика высоких температур. – 2000. – Т. 38, № 2. – С.191–196.

8. *Errington J. R., Panagiotopoulos A. Z.* // J. Chem. Phys. 1998.V. 109, N. 3 P. 1094.

9. *Лифшиц Е.М., Питаевский Л.П.* Физическая кинетика. Курс теоретической физики, том 10. М: Наука, 1979.

10. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Механика. Курс теоретической физики, том 1. М: Наука, 1979.

11. *Мамедов Ф. Ф., Кулиев Ф.А., Азизов А.Г.* // Химия и технология топлив и масел.1999. № 6. С. 26.

ГЛАВА 6. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ И ТЕПЛООБМЕНА В ВЫСОКОВОЛЬТНОМ МАСЛОНАПОЛНЕННОМ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИИ

Представлены результаты численного решения системы уравнений движения и энергии для течений термовязкой жидкости в каналах ВМЭО, получены динамические картины крупномасштабного вовлечения слоев термовязкой жидкости с различной температурой в конвективную область и их последующего перемешивания. Показано, что процесс теплообмена связан с развитием неустойчивостей в канале и в термовязкой жидкости наиболее интенсивно происходит в окрестности точки перегиба, а не в пристеночной области, где существует сильная генерация завихренности. Рассматриваемое течение оказывается неустойчивым относительно гармонических возмущений конечной амплитуды, оно имеет ряд резонансных частот, вызывающих наиболее активное вовлечение слоев жидкости в теплообмен. Приведены результаты численного моделирования процессов сложного сопряженного теплообмена, протекающих в силовых трансформаторах большой мощности. Проведено моделирование течений и теплообмена внутри трансформатора со статической защитой от взрыва. Выполнен анализ результатов расчетов в программном комплексе FlowVision и проведено сравнение построенной модели с реальными экспериментальными данными тепловых испытаний трансформатора.

6.1. ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛООБМЕНА В ВЫСОКОВОЛЬТНОМ МАСЛОНАПОЛНЕННОМ ОБОРУДОВАНИИ

Особенности теплообмена в высоковольтном маслонаполненном оборудовании следуют из нормативных условий работы ВМЭО, рабочий диапазон которого находится в интервале от полярных условий до высоких температур работы энергетических устройств в пустынях. Принимая рабочий диапазон ВМЭО на уровне 65 °С, получим условия, при которых трансформаторное масло обладает существенной зависимостью вязкости от температуры, при изменении температуры от 20 °С до 80 °С вязкость трансформаторного масла изменяется в 150 раз, т.е. при моделировании теплообмена необходимо учитывать особенности термовязкой жидкости.

6.1.1. Термовязкость трансформаторного масла. Явление термовязкости, классы термовязких жидкостей (ТВЖ)

Во многих классических задачах гидромеханики физические (материальные) параметры жидкостей часто полагаются постоянными. Характерной особенностью термовязких сред является то, что их поведение определяется взаимодействием полей скорости и температуры. Существование

зависимости вязкости от температуры, свойственный реальным жидкостям, становится особенно важным в случае органических и неорганических масел, жидких металлов, полимеров и природной лавы. Отличительным свойством термовязких жидкостей является наличие резкой зависимости вязкости от температуры, а также существование ее немоного поведения в области химических реакций. Так, в частности, кинематическая вязкость меда в диапазоне 298–372 К изменяется в 125 раз, а вязкость ртути – в 146 раз [1]. Таким образом, вязкость может меняться на несколько порядков в относительно узком температурном диапазоне.

Проведенные исследования [2] для полистирена, протеинов, яблочного сока и также растительных масел, показывают, что температурная зависимости вязкости для этих веществ может быть описана двух- и трехпараметрическими зависимостями типа Арениуса:

$$\mu = Ae^{-a_1/RT}, \quad \ln\mu = a_1 + \ln T, \quad \ln\mu = a_1 + a_2/T, \quad (6.1)$$

$$\ln\mu = a_1 + \frac{a_2}{T+a_3}, \quad \ln\mu = a_1 + \frac{a_2}{T} + \frac{a_3}{T^2}, \quad \ln\mu = a_1 + \frac{a_2}{T} + a_3T, \quad (6.2)$$

кроме того, может использоваться аппроксимация полиномами второго порядка или функция типа Больцмановской:

$$\mu = a_1 + a_2T + a_3T^2, \quad \mu = a_1 \frac{a_2 - a_1}{1 + e^{(T - a_3)/a_4}}, \quad (6.3)$$

где T – температура, $a_1 - a_4$ – константы, определяемые экспериментально. Первая из серии формул (6.2) хорошо описывает поведение неорганических жидкостей, способных к стеклованию [3], и называется формулой Фогеля–Таммана–Фулчера. Аналогичное соотношение (уравнение Вильямса–Ландела–Ферри) было установлено в [4] для вязкости аморфных полимеров.

Вязкость и реологические свойства [5] являются важнейшими характеристиками тяжелых топлив, нефтяных остатков и минеральных масел, так как они оказывают влияние на сложность и продолжительность нефтеналивных операций, условия транспортировки, в том числе на гидравлические характеристики при прокачке по трубопроводам.

Одним из распространенных методов модификации реологических свойств тяжелых сырых нефтей и продуктов их переработки является тепловой нагрев. В серии экспериментов авторы [5] показали существование различных температурных эффектов, возникающих при протекании химических реакций вследствие присутствия резино-асфальтеновых веществ, к числу которых следует отнести обнаружение «отрицательной» аномалии вязкости. После термообработки происходит резкое изменение реологических характеристик, связанное с существенным увеличением вязкости – таким образом, в противовес общепринятым суждениям, тепловая обработка не всегда приводит к улучшению реологических свойств. В [6] были продолжены исследования конечной вязкости углеводородов для двух образцов, имеющих различный состав механических примесей, асфальтенов, парафи-

нов, а также смол, однако, помимо термостатического нагрева применялся нагрев в радиочастотном и микроволновом диапазонах. Тепловой и микроволновый нагрев привел к значительному росту вязкости (более чем в четыре раза) в диапазоне 40–60 °С, что связано в фазовым переходом, который испытывают пространственные структуры молекул составляющих веществ (парафинов). Как только температура превышает некоторое критическое значение, структурно измененные частицы асфальтенов не могут быть полностью сольватированы смолистыми веществами. В результате усиливается поглощение других коллоидных частиц, в частности, микрокристаллов парафинов. Таким образом, при адсорбции молекул асфальтенов на поверхности парафиновых кристаллов появляются прочные пространственные структуры. При большей температуре обработки происходит расплавление кристаллов парафинов и адсорбция асфальтенов становится невозможной. Новые микрокристаллы парафинов появляются при температуре ниже температуры плавления.

Сера находит применение в таких отраслях промышленности, как энергетика, космическая техника, радиоэлектроника, химическая технология. В частности, она может использоваться как теплоноситель в тепловых трубах, а также характеризуется как относительно малотоксичный материал с малой чувствительностью к ионизирующим излучениям. В работе [7] проводились высокоточные измерения ее динамической вязкости в зоне резкого изменения $T = 350\text{--}1000$ К. Вязкость жидкой серы убывает от точки плавления до температуры $T = 428$ К, а в интервале температур $T = 432\text{--}469$ К возрастает на 4 порядка. Дальнейшее снижение T приводит к постепенному уменьшению вязкости, однако, даже в области высоких температур вязкость расплава остается аномальной. Полимеризация расплава жидкой серы не имеет аналогий среди простых жидкостей и классифицируются как фазовый переход за критического типа.

По форме кривой теплоемкости в окрестности температуры 423 К фазовый переход также называется λ -переходом.

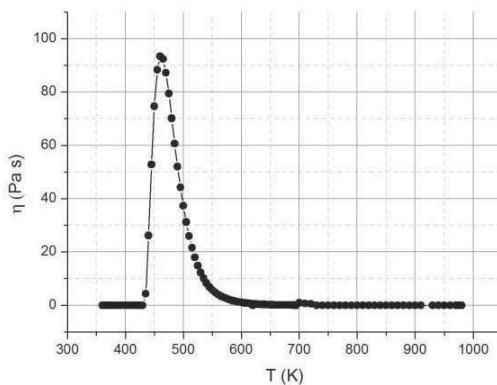


Рис. 6.1. Температурная зависимость динамической вязкости жидкой серы по результатам измерений [7]

В работе [8] рассматривается процесс стекания жидкой пленки со следующим аппроксимациями вязкости:

$$\mu = a_1(T - a_2) + a_3, \quad \mu = a_1 e^{-a_2 \frac{T-a_3}{a_3}}, \quad \mu = e^{\frac{a_1 a_2^2}{a_3} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{a_2}\right)}. \quad (6.4)$$

В статье [9] авторы рассмотрели стационарное течение вязкой несжимаемой жидкости в окрестности полубесконечной пластины с учетом химических реакций, используя соотношения для обратной вязкости:

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{\mu_{\infty}} (1 + a_1(T - T_{\infty})), \quad (6.5)$$

где $a_1 > 0$ для жидкостей и $a_1 < 0$ для газов.

В работе [10] исследуются водные растворы поваренной соли, на основе удобной аппроксимации вязкости воды в широком диапазоне температур (0–325 °C) и давлений (0.1–40) МПа:

$$\mu = \mu_0(\tau + 1)^2 e^{\sum_{i=0}^{10} c_i \tau^i} + \pi \sum_{i=0}^{10} d_i \tau^i, \quad (6.6)$$

где $\tau = \left(\frac{T}{T_0} - 1\right)$, $T_0 = 293.15$, $\pi = p - p_0$, p_0 – давление насыщенного водяного пара, c_i, d_i – табличные константы, подлежащие определению.

Работа [11] посвящена устойчивости неизотермического течения в канале между двумя параллельными теплопроводными пластинами с использованием экспоненциальной зависимости вязкости $\mu = e^{b(T-T_0)}$, где b, T_0 – эмпирические константы.

В работе [12] проведены измерения вязкости различных расплавов стекол в соответствующих координатах – $\left(T - T_0, \frac{T-T_0}{\ln(\mu(T)/\mu(T_0))}\right)$, результаты которых показывают, что у некоторых сортов боросиликатных стекол при $\Delta[T - T_0] = 12 \text{ K}$ изменение ординаты составляет $\Delta\left[T - T_0 / \ln(\mu(T) / \mu(T_0))\right] = 250 \text{ K}$. Таким образом, $\ln(\mu(T)/\mu(T_0)) \approx 21$.

Подробный ретроспективный обзор аппроксимаций вязкости, начиная с О. Рейнольдса, можно найти в статье Ситона (Seeton) [13], кроме того, им была предложена новая широкодиапазонная функциональная зависимость.

Работа [14] освещает некоторые особенности установившегося движения жидкости в плоском канале бесконечной длины с вязкостью, зависящей от температуры по обратному степенному закону $\mu = \mu_0 T_0^n / T^n$. В предположении постоянной температуропроводности и малости тепловыделения из-за вязкой диссипации уравнения движения и энергии сводятся к системе ОДУ. Авторы указывают на возможность существования автомодельных решений. С использованием метода конечных разностей при различной интенсивности теплообмена на стенке было установлено, что зависимость числа Пекле не является однозначной функцией безразмерной вариации давления. Особого внимания заслуживает

вает факт появления точки перегиба в профиле скорости при достаточно интенсивном теплообмене.

Кинематическая вязкость воды в диапазоне температур 10–90 °С может быть представлена в виде обратной линейной функции [7.15]. С учетом этого обстоятельства на основе приближения Буссинеска авторами аналитически решена задача о свободной и вынужденной конвекции жидкости в двумерной постановке.

Таблица 6.1. Вязкость расплава силиката калия при атмосферном давлении

T, °C	1000	1100	1200	1300
η , пуаз	21652	5012	1778	661

В работе [16] представлены измерения кинематической вязкости расплавов $Si_{100-x}Al_x$, $x = 0-100$ % в диапазоне от температуры плавления до 1100–1450 °С. Кривая зависимости вязкости от температур имеет простую экспоненциальную форму, предсказываемую активационными теориями вязких течений. Сходным образом [17] описывается и зависимость вязкости расплавленного чугуна и низкоуглеродистой стали, расплавов $Fe-Si$ [18].

Вязкость магматических расплавов

С точки зрения термовязкости особый интерес представляют собой магматические расплавы. Детальный анализ концентрационной, температурной и барической зависимостей таких гранитно-флюидных систем дан в [19]. С относительно высокой точностью (± 10 %) в интервале температур $T = 800-1450^\circ\text{C}$ и давлений жидкости до 400 МПа изучалась вязкость модельных расплавов ($K_2O \cdot 4SiO_2$; $K_2O \cdot 4SiO_2 + Ar + H_2O$; $Na_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$; $Na_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 + H_2O$; $Na_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 + Ar$), а также расплавов горных пород (гранит + H_2O ; гранит + $H_2O + HCl$; гранит + $H_2O + HF$; гранит + $H_2O + NaCl$). Одним из образцов, проявляющим сильные термовязкие свойства, является расплав силиката калия, для него зависимость динамической вязкости от температуры описывается законом Аррениуса (первая из формул (6.1)). В таблице 6.1 представлены экспериментальные результаты по вязкости расплава силиката калия при атмосферном давлении, показывающие, что в относительно узком интервале температур $\Delta T = 300$ К она падает в 32.8 раза. Геологические наблюдения дают основания полагать, что смешение базальтовых магм является достаточно быстрым процессом [20], в то время как риолиты (магматическая горная порода кислого состава, вулканический аналог гранита) и базальты могут проходить через вулканические трубки, практически не смешиваясь. Разница вязкости базальтовых магм редко превышает один порядок, это же отношение в случае кислых магм и основных (базальтовых) может достигать 5–7 порядков. Объяснение слабого смешения дается в разделе 7.2 в контексте обсуждения результатов работы [20].

6.1.2. Термовязкость минеральных масел

Для экспериментального изучения термовязких жидкостей, рассмотренных ранее (расплавы стекол, сера, расплавы силикатов), необходим нагрев большого количества рабочей среды до достаточно высоких температур ($T = 900\text{--}1500\text{ К}$), что вызывает дополнительные трудности при создании экспериментальных стендов. В связи с этим представляется целесообразным использовать жидкости, у которых «вязкий переход» (зона резкого изменения вязкости) приходится на диапазон умеренных температур ($T = 243\text{--}393\text{ К}$), достижимый обычными промышленными холодильниками и нагревателями, – минеральные индустриальные и моторные масла.

Кинематическая вязкость трансформаторных масел различных марок (ТК ОКП, Т-750 ОКП, Т-1500 ОКП, ПТ, ГК, ТСО) для характерных температур – 50 °C , -30 °C изменяется в одном и том же диапазоне – $1600\text{--}8\text{ сСт}$.

Более предпочтительными с точки зрения экспериментальных исследований являются высоковязкие индустриальные и вакуумные масла. Паспортные данные индустриального масла И-50 указывают на более высокое значение кинематической вязкости по сравнению с трансформаторными при температуре 40 °C – $90\text{--}110\text{ сСт}$. Вакуумные масла ВМ-5 и ВМ-6 имеют наивысшие показатели по вязкости среди вакуумных масел при 20 °C – 70 сСт и 220 сСт соответственно. Важным преимуществом вакуумных масел является высокая температура застывания (не выше -12 °C). Также в экспериментальных исследованиях возможно применение широко распространенных трансмиссионных масел ТЭП-15 ($\mu_{T=100\text{ °C}} = 157\text{ сСт}$, $\mu_{T=-15\text{ °C}} = 2105\text{ сСт}$) и ТСП-10 ($\mu_{T=100\text{ °C}} = 109\text{ сСт}$). Характерной особенностью рассмотренных жидкостей является то, что наиболее подходящие из них являются непрозрачными в видимом диапазоне, – для их изучения требуется применение специальной диагностики, в частности, ультразвуковых методов [21].

Очевидно, что для как лабораторных, так и вычислительных экспериментов паспортных данных рабочих сред оказывается недостаточно, таким образом, необходимы дополнительные измерения вязкости с применением термостагирования.

Вакуумное масло ВМ-6 используется для механических вакуумных насосов, работающих при остаточном давлении до $1.0\text{--}3.0 \times 10^{-1}\text{ Па}$, и вырабатывается из малосернистых беспарафинистых нефтей путем глубокой очистки из их узких фракций и применением 1–2 ступеней тонкой вакуумной дистилляции [22]. Следует отметить, что при низких температурах ($T < 2\text{ °C}$) масло ВМ-6 по внешнему виду и вязкостным свойствам представляет собой пластичную смазку, при этом в области $-2\text{--}0\text{ °C}$ наблюдается переход к «жидкости». На рис. 6.5 в безразмерном виде представлены зависимости трансформаторного масла марки ГК, вакуумного масла марки ВМ-6, а также медицинского вазелина от температуры.

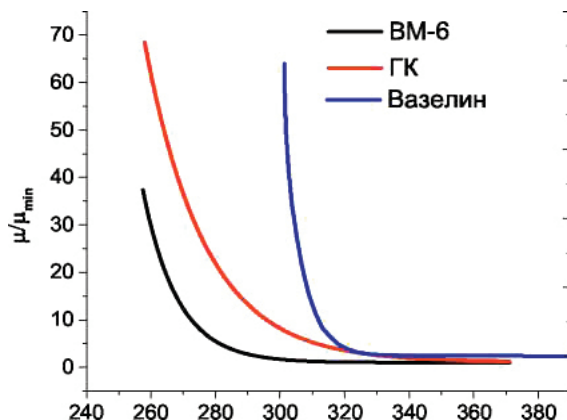


Рис. 6.2. Зависимость динамической вязкости от температуры для трансформаторного масла марки ГК и для вакуумного масла ВМ-6, а также медицинского вазелина

Для экспериментального изучения термовязких жидкостей, рассмотренных ранее (расплавы стекол, сера, расплавы силикатов), необходим нагрев большого количества рабочей среды до достаточно высоких температур (900...1500 К), что вызывает дополнительные трудности при создании экспериментальных стендов. В связи с этим представляется целесообразным использовать жидкости, у которых «вязкий переход» (зона резкого роста вязкости) приходится на диапазон умеренных температур (243...393 К), достижимый обычными промышленными холодильниками и нагревателями, — минеральные индустриальные и моторные масла.

Кинематическая вязкость трансформаторных масел различных марок (ТК ОКП, Т-750 ОКП, Т-1500 ОКП, ПТ, ГК, ТСО) для характерных температур -50°C , -30°C изменяется в пределах одних значений — 8...1600 сСт. Их температура застывания составляет -45 ... -55°C . Более предпочтительными являются высоковязкие индустриальные и вакуумные масла. Паспортные данные индустриального масла И-50 указывают на более высокое значение кинематической вязкости по сравнению с трансформаторными при температуре 40°C — 90...110 сСт. Вакуумные масла ВМ-5 и ВМ-6 имеют наивысшие показатели по вязкости среди вакуумных масел при 20°C — 70 сСт и 220 сСт соответственно. Важным преимуществом вакуумных масел является высокая температура застывания (не выше -12°C). Также в экспериментальных исследованиях возможно применение широко распространенных трансмиссионных масел ТЭП-15 ($\eta_{t=100^{\circ}\text{C}} = 157$ сСт, $\eta_{t=-15^{\circ}\text{C}} = 2105$ сСт) и ТСП-10 ($\eta_{t=100^{\circ}\text{C}} = 109$ сСт). Характерной особенностью рассмотренных жидкостей является то, что наиболее подходящие из них являются непрозрачными в видимом диапазоне, — для их изучения требуется применение специальной диагностики, в частности, ультразвуковых методов.

Ограничение на выбор рабочей жидкости оказывает и диапазон развиваемых гидростатических давлений, т.к. высоковязкие жидкости труднее «продавить» через всю систему подводящих каналов, а у маловязких жидкостей (растительное и минеральное масло) может произойти преждевре-

менный переход к турбулентности во входном отверстии экспериментального канала.

На первом этапе исследований в качестве рабочей жидкости было выбрано трансформаторное масло марки ГК, на котором проводились первые пуски экспериментальной установки. В связи с тем, что указанные по ГОСТ значения вязкости масла являются недостаточными, были проведены специальные измерения вязкости в требуемом температурном диапазоне $-5...70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Эксперименты проводились на ротационном вискозиметре BROOKFIELD DV-II+Pro.

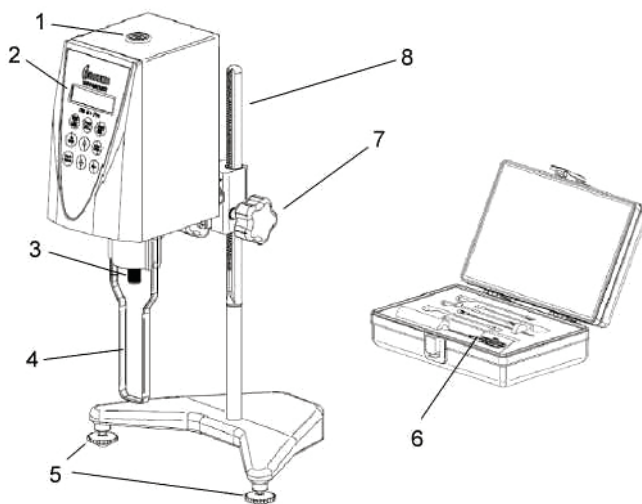


Рис. 6.4. Общий вид вискозиметра BROOKFIELD DV-II+Pro. Цифрами обозначены: 1 – пузырьковый уровень, 2 – измерительный блок вискозиметра, 3 – соединительный узел шпинделя, 4 – защитная нога, 5, 7 – регулировочные винты, 6 – набор шпинделей, 8 – штатив

Для нахождения зависимости вязкости от температуры применялась следующая методика:

1. предварительное охлаждение образца до температуры $T = -15\text{ }^{\circ}\text{C}$;
2. выполнение автоматической установки 0, авторизация шпинделя, выбор шпинделя (в случае масла ГК – DIN-85) и системы единиц измерения (SI или CGS);
3. выбор приемлемой скорости вращения в диапазоне $0...200$ об/мин. Скорость вращения выбирается таким образом, чтобы измерения вязкости проводились при значениях крутящего момента от $10...100\%$ во всем диапазоне измеряемых температур;
4. подключить щуп измерения температуры к вискозиметру;
5. закрепить пробу и запустить шпиндель;
6. по мере нагревания пробы до температуры окружающей среды произвести вывод данных на печатающее устройство – принтер с порта подключения LPT-1 (при измерении высокотемпературного диапазона применялся

нагрев образца масла в водяной бане). Измеряемые величины выводятся на печать в порядке: RPM – скорость вращения шпинделя, M – модель вискозиметра, S – номер шпинделя, доля от полного крутящего момента, значение динамической вязкости (мПа·с), SS – сдвиговое напряжение (Н/м²), SR – сдвиговая скорость (с⁻¹), температура (°C). Рабочий диапазон для шпинделя DIN-85 составляет 0.7...5000 сПуаз (мПа·с). Относительная приборная погрешность $\sigma_\eta = 0.015$, погрешность измерения щупом температуры $dT = 1$ К.

По результатам экспериментов получены значения вязкости с шагом по температуре $\Delta T = 0.1$ К.

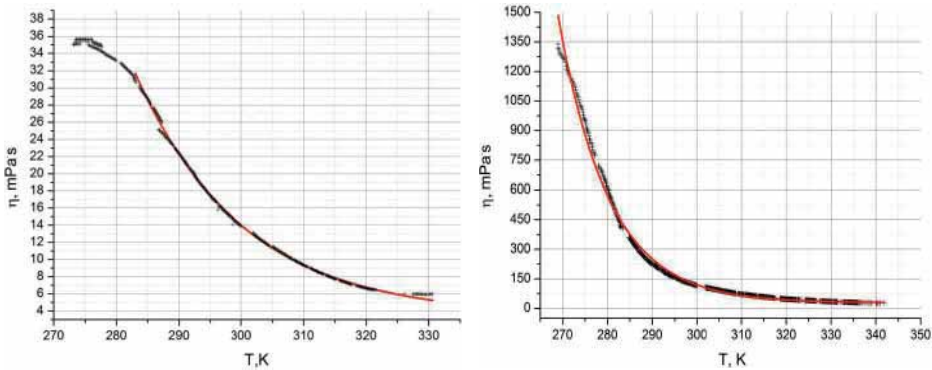


Рис. 6.5. Зависимость динамической вязкости от температуры для трансформаторного масла марки ГК (слева) и вакуумного масла ВМ-6 (справа). Черными точками выделены измеренные значения, красная линия – аппроксимированная кривая

В выбранном диапазоне температур вязкость может быть аппроксимирована функцией $\eta = \eta_0 + Ae^{-\frac{T}{T_1}}$, $\eta_0 = 3,46312$, $\delta_{\eta_0} = 0,0404$, $A = 3,81136 \times 10^8$, $\delta A = 2,27209 \times 10^7$, $T_1 = 17,23621$, $dT_1 = 0,06325$. Аппроксимация проводилась методом наименьших квадратов по 1087 точкам.

Вакуумное масло ВМ-6 используется для механических вакуумных насосов, работающих при остаточном давлении до $1,3 \cdot 10^{-1}$ Па, и вырабатывается из малосернистых беспарафинистых нефтей путем глубокой очистки из их узких фракций и применением 1–2 ступеней тонкой вакуумной дистилляции *shkolnikovs*. Данное масло является одной из предпочтительных рабочих сред, для его образца также были выполнены измерения вязкости с помощью шпинделя $LV - 2 LV - 2$.

В выбранном диапазоне температур вязкость аппроксимируется функцией $\eta = \eta_0 + Ae^{-\frac{T}{T_1}}$, $\eta_0 = 27,59321$, $\delta_{\eta_0} = 1,0827$, $A = 3,99758 \times 10^{13}$, $\delta A = 4,67991 \times 10^{12}$, $T_1 = 11,19117$, $\delta T_1 = 0,05372$. Аппроксимация проводилась методом наименьших квадратов по 1117 точкам. Следует отметить, что при низких температурах ($T < 2^{\circ}C$) масло ВМ-6 по внешнему виду и вязкостным свойствам представляет собой пластичную смазку, при этом в области 2...0 °C наблюдается переход к жидкости.

6.2. ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ТЕЧЕНИЙ ТЕРМОВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ

За последнее время в России наиболее интересные результаты по динамике термовязких жидкостей были получены С.Ф. Урманчевым [23] и его коллегами. В частности, в работе [24] представлены результаты численного исследования плоского течения жидкостей с модельной немонотонной зависимостью кинематической вязкости от температуры в форме Гауссиана

$$\nu(T) = \nu_{\min}(1 + A \exp(-B(T - T_*)^2)), \quad A = \frac{\nu_{\max}}{\nu_{\min}} - 1, \quad T_* = \frac{T_0 + T_w}{2}, \quad (6.7)$$

где ν_{\max} и ν_{\min} – максимальная и минимальная кинематические вязкости в температурном диапазоне $[T_0, T_w]$. Рассмотрена задача о втекании нагретой жидкости в канал с охлаждаемыми стенками без учета саморазогрева жидкости (объемного тепловыделения) от сдвиговых напряжений.

Установлено, что по мере охлаждения жидкости в канале для любого плоскопараллельного слоя достигается такой диапазон температур, что вязкость в нем принимает значения, близкие к максимальным, таким образом, по сечению канала возникает «вязкий барьер» – «пробка» из вязкой жидкости, которая перекрывает все поперечное сечение канала. Существование вязкого барьера приводит к вытеснению массы жидкости из пристеночных слоев к оси канала и соответствующему увеличению продольной скорости в центральной зоне. Следует отметить очевидную связь рассматриваемого течения с задачами вулканологии [25].

В статье [26] рассматривается тепловая конвекция термовязкой жидкости в квадратной области с горизонтальными изотермическими и вертикальными адиабатическими стенками. Квадратичная зависимость динамической вязкости от температуры вида

$$\mu = 4 \left(\frac{\mu_{\max}}{\mu_{\min}} - 1 \right) T^2 + 1 \quad (6.8)$$

имитирует реологические свойства водных растворов метилцеллюлозы, использующиеся для повышения нефтеотдачи пластов. С ростом температуры до точки начала гелеобразования раствор метилцеллюлозы ведет себя как обычная жидкость, вязкость ее убывает, однако, за пределами критической точки – резко возрастает. Авторы исследовали теплообмен на изотермических стенках, а также глобальную структуру течения в зависимости от числа Релея. Показано, что для квадратичной зависимости вязкости от температуры минимальное критическое число Релея почти в три раза превосходит теоретическое значение, полученное для случая постоянной вязкости. Установлено существование трех стационарных режимов тепловой конвекции: одновихревого, симметричного двухвихревого и асимметричного двухвихревого. Эти режимы последовательно сменяются периодическими, квазипериодическими и хаотическими режимами конвекции, а немонотонная зависимость вязкости от температуры ухудшает теплообмен на изотермических стенках.

При втекании в канал с охлаждаемыми стенками нагретой жидкости с монотонно убывающей зависимостью вязкости [27] от температуры экспо-

ненциального типа может происходить скачкообразное увеличение расхода жидкости с ростом перепада давления. Причина этого явления состоит в том, что рост перепада давления приводит к уменьшению влияния теплообмена и, соответственно, степени прогрева сечения канала. При этом происходит размыкание изолиний вязкости, и высоковязкая область потока разделяется на две зоны, примыкающие к стенкам канала, а осевая область канала по всей его длине оказывается занятой жидкостью с температурой, близкой к исходной, и с малой вязкостью. При втекании аномально термовязкой жидкости, нагретой выше температурной аномалии вязкости, в канал, содержащий ту же жидкость, при температуре стенок канала ниже температурной аномалии вязкости, обнаружена зависимость режима установления течения жидкости от интенсивности теплообмена (числа Нуссельта Nu) на стенках канала: поршневой режим (1), при котором в силу малости теплообмена ($Nu < 0.15$) нагретая жидкость вытесняет холодную, «вязкий барьер» перемещается по длине канала до выхода за его пределы, что приводит к резкому росту расхода жидкости с температурой, равной температуре втекания; режим стабилизации (2) – $0.15 < Nu < 0.3$ движения «вязкого барьера» прекращается, а расход жидкости оказывается на минимальном уровне. При $0.3 < Nu < 5.0$ имеет место колебательный (3) режим изменения расхода жидкости по времени. При больших значениях числа Нуссельта течение устанавливается с величинами расхода (4), соответствующей случаю граничных условий первого рода.

Численное моделирование [28] свободной конвекции аномально термовязкой жидкости в плоской ячейке позволило изучить влияние параметров аномалии вязкости на режимы конвективных течений и интегральные коэффициенты теплоотдачи в плоской ячейке, подогреваемой снизу, с вертикальными теплоизолированными границами. Обнаружены области параметров, при которых существует «вязкий барьер», оказывающий влияние на тепло-массоперенос. Выявлены зоны параметров задачи, при которых аномалия вязкости не влияет на картину течений. Кроме того, существуют режимы, при которых «вязкий барьер» является либо стационарным, либо динамически изменяется и взаимодействует с течением, имея при этом периодический характер.

Температурная зависимость вязкости жидкости может оказать влияние на устойчивость ламинарного режима течения [29, 30] в плоском канале с неоднородным распределением температуры. Авторами были получены аналитические выражения, описывающие профили скорости в невозмущенном состоянии для линейной и экспоненциальной зависимостей вязкости от температуры, а также система уравнений для амплитуд возмущений скорости и температуры, которая в случае изотермического течения может быть сведена к классическому уравнению Орра–Зоммерфельда. Исследование спектров собственных значений для ламинарных течений с различными зависимостями вязкости жидкости от температуры обнаружило значительные различия между спектрами собственных значений для течения термовязкой жидкости и жидкости с постоянной вязкостью. Кроме того, было показано, что учет температурной зависимости вязкости жидкости оказывает существенное влияние на устойчивость ламинарного течения жидкости.

Касательно формы профилей, полученных для двух зависимостей вязкости, можно заметить, что при слабом влиянии экспоненты профиль скорости должен совпадать со случаем линейной зависимости вязкости от температуры, так как экспоненциальная зависимость на начальной стадии может быть разложена в ряд Тейлора по степеням «термовязкого» параметра.

Несмотря на то, что исследования [29, 30] представляют интерес, они, к сожалению, не являются пионерскими в вопросах влияния термовязкости на устойчивость течений ТВЖ, – исторический приоритет здесь имеют работы [31, 32, 33, 34].

6.2.1. Изучение процессов теплообмена в ТВЖ

Некоторые исследования показали [35, 36], что гидродинамика мелких масштабов в значительной степени подвержена крупномасштабным движениям. Эта связь оказывается особенно сильной в течениях с вязкой стратификацией, где в зависимости от условий реализации течения переменная вязкость может оказывать как стабилизирующее, так и дестабилизирующее воздействие на развитие возмущений. Вместе с тем, согласно базовым предположениям [37] широко применяемой теории K41 Колмогорова при больших числах Рейнольдса статистические свойства турбулентности в инерционном и диссипативном интервале не зависят от способа возбуждения турбулентности и универсальным образом определяются тремя параметрами: скоростью диссипации ε , кинематической вязкостью ν и самим масштабом l (гипотеза № 1), в инерционном интервале число определяющих параметров уменьшается до двух – скорости диссипации и масштаба (гипотеза № 2). Из этих положений вытекает неявное следствие, заключающееся в том, что вязкость оказывается существенной лишь на малых масштабах и, следовательно, не должна иметь определяющего влияния на процесс крупномасштабного смешения. В результате в подавляющем большинстве работ рассматриваются потоки однородной жидкости или течения со стратифицированной плотностью.

Вместе с тем оказывается, что в спутном [38] течении двух жидкостей с разными кинематическими вязкостями процесс смешения отличается многомасштабностью, тогда как в течениях с постоянной вязкостью происходит генерация обычных вихрей Кельвина–Гельмгольца. Авторами [38] было предложено феноменологическое описание процесса смешения, при котором моли окружающей жидкости вследствие различных неустойчивостей увлекаются в затопленную струю, создают дополнительное сопротивление потоку жидкости, замедляя основное течение и приводя к пульсациям радикальной скорости (неустойчивость в следе).

Греа (Grea) и др. [39] исследовали распад несжимаемой однородной изотропной турбулентности в жидкости, обладающей переменной вязкостью, которая полагалась линейно зависящей от скаляра, в качестве которого может выступать температура или концентрация, подчиняющиеся уравнению адвекции-диффузии.

При высоких числах Рейнольдса прямое численное моделирование позволило подтвердить справедливость постулата Тейлора [40] о том, что диссипация не зависит от вязкости и ее флуктуаций.

При низких числах Рейнольдса авторы показали существование дополнительной кинетической энергии, что является следствием эффектов переменной вязкости. Таким образом, подразумевается, что турбулентная кинетическая энергия в жидкостях с переменной вязкостью спадает медленнее со временем.

Кроме того, установлено, что второй дополнительный член в уравнении для диссипации ТКЭ является знакопостоянным и снижает скорость диссипации в потоке, а влияние переменной вязкости приводит к существенному сокращению ее «эффективного» значения, оказывающегося пропорциональным дисперсии флуктуаций вязкости.

Объяснение данному явлению дается с точки зрения статистического подхода, указывающего на существование «эффективного» числа Рейнольдса, которое оказывается большим, чем для потока со средней, но постоянной вязкостью. Этот факт согласуется с общей феноменологией, наблюдаемой при больших числах Re , так как дополнительная энергия содержится в малых масштабах, что находит свое отображение в спектрах кинетической энергии. Также наблюдается, что участки с интенсивной кинетической энергией могут выживать в областях, соответствующих малой вязкости. Таким образом, турбулентные вихри являются ограниченными и вращаются только в областях малой или почти однородной вязкости. В этом контексте развитие «хвостов» в спектре может быть интерпретировано как возвращение (восстановление) роли членов, отвечающих за турбулентный перенос, по сравнению с вязкими членами.

На некоторых режимах течения турбулентность может поддерживать себя дольше, то есть участки с большой вязкостью являются ламинарными, а турбулентная кинетическая энергия выживает и может переноситься к малым масштабам. Такую турбулентность, сочетающую в себе ламинарную и турбулентную «фазы», можно назвать очаговой («lumru»).

В работе [20] исследовалось влияние вязкости на процесс смешения в том случае, если маловязкая турбулентная струя впрыскивается в более вязкую жидкость. В зависимости от выбранного соотношения вязкостей $R_v = 1-400$ наблюдались существенные различия в процессе смешения: если вязкости двух жидкостей приблизительно равны, турбулентность в затопленной струе приводит к интенсивному перемешиванию, в результате чего образуется слой смешения со стратифицированной вязкостью, если же отношение вязкостей превышает $R_v = 400$, то сколь-нибудь заметного макроскопического смешения жидкостей не происходит. В последнем случае выходит так, что большой импульс инжектируемой жидкости не передается более вязкой окружающей среде (host fluid), так как величины напряжений от возмущения на межфазной границе оказываются не достаточно велики для преодоления вязких напряжений, его подавляющих. В продолжение исследования Кэмпбелла (Campbell) и Тернера (Turner) с применением методов LIF и PIV были измерены характеристики [41] (дисперсия скаляра и моменты скорости в осевой плоскости) турбулентной затопленной маловязкой струи в более вязкую при $Re = 2000$ в диапазоне отношения вязкости $R_v = 1-55$. В целом, авторы подтвердили результаты [20], связанные с существенным уменьшением растекания (и смешения) струи при наличии сильного разры-

ва вязкости $R_v \geq 20$. Обнаружено, что при $R_v = 45$ в струе наблюдается последовательность вложенных структур, напоминающих наконечник стрелы. Причем, чем дальше проникает струя, тем плотнее «упаковка» когерентных структур, что приводит к очень существенному подавлению мелкомасштабного течения на больших дистанциях, а также к выдавливанию включений высоковязкой жидкости из осевой зоны, которые были захвачены ранее.

В работе [42] представлено феноменологическое и статистическое описание самых ранних стадий временной эволюции слоя смешения, в которой медленно движущаяся (покоящаяся) жидкость в $R_v = v_{low}/v_{high}$ как раз является более вязкой, чем быстродвижущаяся. Прямое численное моделирование было выполнено для двух отношений вязкости $R_v = 1$ и $R_v = 9$, без стратификации по плотности. В качестве безразмерного критерия выступает число Рейнольдса, определяемое по начальной толщине потери импульса $\delta_{\theta,0}$ и средней вязкости v_{ref} т.е. $Re_{\delta_{\theta,0}} = U_0 \delta_{\theta,0} / v_{ref} = 160$, $v_{ref} = v_{low} + v_{high}$, для потока с постоянной вязкостью и $Re_{\delta_{\theta,0}} = 16,32$ для переменной вязкости. Показано, что в последнем случае влиянию вариации вязкости подвержены не только малые масштабы турбулентного движения, но и усредненный профиль скорости, деформация которого происходит вследствие одновременного воздействия градиентов средней скорости и вязкости. В случае потоков с переменной вязкостью наблюдается ускоренный переход у турбулентности со слабовыраженными когерентными периодическими движениями. Кроме того, подтверждается то предположение, что временная эволюция толщины потери импульса описывается двумя параметрами – числом Рейнольдса и отношением вязкостей. В течении термовязкой жидкости в канале может наблюдаться появление дополнительной точки перегиба. В процессе смешения наблюдается большое количество мелких вихревых трубок, вытянутых по потоку, соединяющих крупные поперечные свертки завихренности (rollers).

6.2.3. Устойчивость и турбулентность течений ТВЖ

Проведенный обзор показывает, что изучение особенностей течения ТВЖ затрагивает вопросы реологии, теории гидродинамической устойчивости, тепломассообмена в течениях с развитой завихренностью, а также турбулентной теории. Несмотря на существование подробных работ [32, 33, 34, 23], исследования в данной тематике трудно считать завершенными.

В частности, большинством исследователей не уделено внимание факту возникновения точки перегиба в профиле скорости, которая может наблюдаться в некотором диапазоне определяющих параметров, что делает целесообразным рассмотрение данного течения с позиции теоремы Релея (хотя и в присутствии вязкости) и теории гидродинамической устойчивости, в особенности в случае больших градиентов вязкости в установившемся течении. Попытка связать математические особенности термовязкого профиля с классом невязких неустойчивостей (inviscid instabilities), а также свойствами линейной устойчивости течения, явилась отправной точкой предлагаемого исследования. Установленная связь характеристик установившегося профиля ТВЖ и областей нейтральной устойчивости сделала актуальным изучение задач смешения с помощью непосредственного моделирования

эволюции течений ТВЖ на основе современных методов вычислительной гидродинамики, призванных дать ответ на вопрос о связи формы профиля скорости с областями наиболее интенсивного развития возмущений, крупномасштабного смешения и характеристиками турбулентности.

Рассмотренные результаты моделирования влияния термовязкости на характеристики течений [39, 42] в основном связаны со случаем развитой турбулентности и свободных сдвиговых течений и не рассматривают процесс «разрушения» основного течения и крупномасштабного смешения, – данное обстоятельство также во многом определило характер решаемых задач.

Отдельным направлением является исследование характеристик, созданных программных реализаций схемы КАБАРЕ, использующих приближение слабой сжимаемости, так как очевидно, что собственные (в т.ч. диссипативные и дисперсионные) характеристики численного метода оказывают непосредственное влияние на результаты численных исследований.

6.2.3.1. Об устойчивости течения термовязкой жидкости в канале

Тепловые режимы течений трансформаторного масла в канале определяются перемешиванием жидкости, что в полной мере зависит от развития гидродинамических неустойчивостей. Гидродинамические течения термовязкой жидкости (ТВЖ) изучались в [1], а вопросы устойчивости двухслойной жидкости с различными вязкостями рассматривались в [2, 3]. В других работах изучались вопросы тепло- и массообмена, гидродинамической устойчивости [4] и турбулентности [5]. Стационарное решение задачи о движении ТВЖ имеет точку перегиба [6] и является неустойчивым [7], поэтому, в соответствии с теоремами Релея, критическая точка, в которой фазовая скорость линейных возмущений совпадает со скоростью течения, является источником возмущений, и этот источник может оказывать решающее влияние на процесс крупномасштабного смешения, причем оно усиливается по мере пространственного развития течения. В тонком пристеночном слое ТВЖ возникает сильный градиент скорости и возникает вопрос, на который можно ответить только после решения нелинейной задачи, а именно – как развиваются возмущения от критической точки и от границы со стенкой, как они взаимодействуют и что определяет неустойчивость и турбулентность в канале ТВЖ – генерация возмущений и завихренности в пристеночных областях или развитие неустойчивости в критической точке Релея? С целью решения этой задачи теории нелинейной устойчивости при возмущениях конечной амплитуды в настоящей работе с применением схемы «КАБАРЕ» численно моделируется плоскопараллельное течение ТВЖ с начальным линейным поперечным распределением температуры. Поле начального течения и распределения температур нарушается гармоническими возмущениями скорости, задаваемыми на входной границе и развивающимися вниз по потоку.

Постановка задачи

Система уравнений движения и энергии для движения термовязкой жидкости в канале имеет вид

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{u} = \mathbf{0} \quad (6.7)$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{u} \mathbf{u} = -\nabla p + \nabla \cdot \mu(T) \mathbf{S} \quad (6.8)$$

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{u} T \right) = \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{u} p - \nabla \cdot \mathbf{q} + \mu(T) \mathbf{S} : \mathbf{S} / 2 \quad (6.9)$$

$$p = c^2 (\rho - \rho_0), \quad (6.10)$$

где динамическая вязкость является резкой функцией температуры T

$$\mu(T) = \mu_0 e^{\beta(T-T_0)/T_0}, \quad (6.11)$$

μ_0 и T_0 – реперные значения вязкости и температуры соответственно,
 $\mathbf{q} = -\lambda \nabla T$ – тепловой поток, $\mathbf{S} = \frac{1}{2} [\nabla \cdot \mathbf{u} + (\nabla \cdot \mathbf{u})^T]$ – тензор скоростей деформации, $\mathbf{u}(u, v)$ – вектор скоростей.

Расчет течения термовязкой жидкости проводится в плоской прямоугольной области шириной L_Y и длиной L_X . В начальный момент предполагается, что течение является установившимся с линейным распределением температуры между горизонтальными стенками канала

$$T_0(y) = \frac{\Delta T}{L_Y} y + T_1, \quad (6.12)$$

где T_1 – температура нижней (холодной стенки), ΔT – перепад температур. В качестве начального условия для скорости используется аналитически найденный профиль продольной скорости [12]

$$U_{prof}(y) = -\frac{C e^{-\alpha y/L_Y}}{\alpha(e^{\alpha-1})} (L_Y - L_Y e^{\alpha y/L_Y} - y + y e^{\alpha}), y \in [0, L_Y], \quad (6.13)$$

где $\alpha = \Delta T \beta / T_0$ – безразмерный комплекс,

$$C = \frac{L_Y^2}{\mu_0} \cdot \frac{\Delta p}{L_X} e^{-\beta(T_1-T_0)/T_0}, \quad (6.14)$$

остающийся стационарным благодаря заданию постоянного линейного градиента давления $\Delta p/L_Y$ по длине канала. Значение безразмерного параметра α выбиралось таким, чтобы точка перегиба была удалена от стенок, а высокоскоростное ядро потока не слишком сильно приближалось к пристеночной области.

Вследствие сжимаемости задача является гиперболической, поэтому ставится задача Коши с начальными условиями на левой границе в виде одномодового возмущения для потоковых переменных в виде

$$V = -\delta U_{max} \sin(2\pi vt), \quad (6.15)$$

где ν – частота возмущения, t – время, δ – относительная амплитуда, U_{max} – максимальное значение продольной скорости в сечении канала. Возбуждение потока на определенной частоте позволяет управлять процессом развития неустойчивости в пространстве и носит название форсинга (forcing) [12]. Такая постановка позволяет лучше привязать предсказания пространственной теории к результатам экспериментов, в которых частота возбуждения ν – действительное число, а волновой вектор k может иметь и комплексную часть.

Ранее нами были получены кривые нейтральной устойчивости рассматриваемого течения термовязкой жидкости [7], из которых следуют важные результаты: наличие двух асимптотик при $Re \rightarrow \infty$, это означает [22], что гидродинамическая неустойчивость развивается от критической точки резонанса и от граничных возмущений.

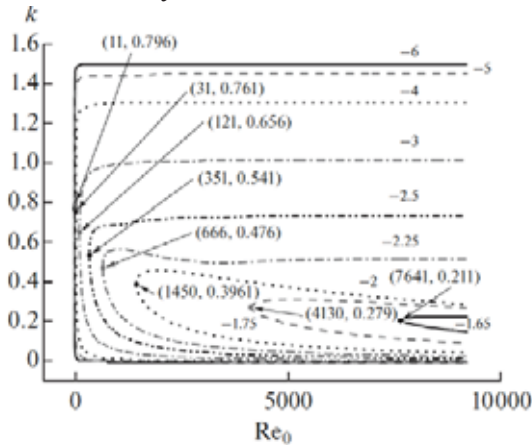


Рис. 6.2. Кривые нейтральной устойчивости течения термовязкой жидкости [7], в скобках приведены значения минимальных чисел Рейнольдса и волновых чисел

Расчетная область со скоростным профилем, являющимся огибающей фронта гидродинамических возмущений, распространяющихся от входной границы канала, показана на рис. 6.1.

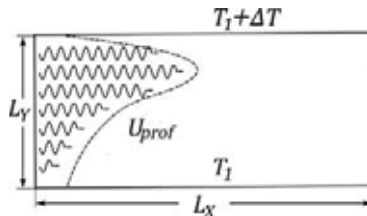


Рис. 6.3. Расчетная область с характерным скоростным профилем

Выбор подобной постановки задачи связан с тем, что время установления профиля скорости, при $a \rightarrow 0$, соответствующее течению Пуазейля, быстро увеличивается при росте параметра a , вследствие увеличения асимметрии профиля. На боковых стенках канала задается условие постоянства температуры и прилипания. В качестве условия на входе задается распределение скорости поперек канала (7), а также величина статического давления.

Численный метод

Применяемый численный метод был разработан и активно развивается школой А.А. Самарского и В.М. Головизнина [8, 9]. Схема «КАБАРЕ» существует в нескольких реализациях и способна описывать течения сжатого газа и несжимаемой жидкости. Для целей настоящего исследования данная схема была нами реализована [10] в приближении слабой сжимаемости с использованием уравнения состояния (4), где p – статическое давление, c – скорость звука, ρ – плотность жидкости в некоторой точке, ρ_0 – характерное (реперное) значение плотности, что позволяет упростить алгоритм отбора локальных инвариантов Римана и отказаться от решения уравнения Пуассона для давления. Схема была протестирована на изотермических задачах о выравнивании давления (частный случай задачи Римана [11]), об установлении течения в канале и распаде двойного слоя вихревой пелены. Текущая реализация позволяет рассчитывать неизоэнтальпические течения, в ней переменная температура T играет роль «активного» скаляра, воздействуя на течение через экспоненциальную зависимость вязкости от температуры. В отличие от LES-методов [1] в классической реализации схемы «КАБАРЕ» какие-либо настроечные параметры отсутствуют. Однако приближение слабой сжимаемости содержит произвольно выбираемую скорость звука c , задаваемую из соотношения

$$c \geq 10 \max(U, V), \quad (6.16)$$

где U и V – компоненты скорости, и определяющую точность модели

$$\sigma_{comp} = \frac{[\max(U, V)]^2}{c^2} = M^2 \leq 0,01. \quad (6.17)$$

Схема «КАБАРЕ» является бездиссипативной (проверено на задаче о диффузии вихря), но в некоторых случаях этим свойством не обладает (распад однородной изотропной турбулентности в трехмерной постановке). Это может быть связано с действием принципа максимума, применяемого при отборе значений переносимых локальных инвариантов.

В расчетах использовалось несколько прямоугольных сеток с различным числом ячеек, необходимых, в частности, для выяснения вопроса сходимости: 512×128 (1), 2048×184 (2), 1024×256 (3), 2048×512 (4). Так как схема «КАБАРЕ» относится к классу явных численных методов, то по условию устойчивости шаг по времени определяется минимальным размером шага по пространству, относящимся к поперечному размеру канала L_y . Данное обстоятельство существенно увеличивает трудоемкость расчетов при измельчении сетки поперек канала. Таким образом, используемые сетки позволяют в основном разрешить крупномасштабные движения. Полный список параметров, определяющих расчетную конфигурацию, приведен в таблице 6.1.

Таблица 6.1. Список основных расчетных параметров

Название параметра	Обозначение	Значение
Скорость звука	c	0.03
Реперная вязкость	μ_0	0.01
Реперная температура	T_0	127.0
Показатель экспоненты	β	-2.3
Длина канала	L_x	8
Ширина канала	L_y	0.4
Перепад давления	Δp	5.0×10^{-4}
Реперная плотность	ρ_0	1000.0
Теплопроводность	λ	0.3
Теплоемкость	c_p	2000.0
Расчетные сетки	$n_x \times n_y$	$512 \times 128, 520 \times 200,$ $2048 \times 184, 1024 \times 256,$ 2048×512
Число Куранта	CFL	200
Относительная амплитуда возмущения	δ	0.15 0.075

По заданным значениям производится расчет инварианта Римана первого рода, приходящего на граничные потоковые ячейки из бесконечности. Инвариант Римана второго рода, приходящий от выходного сечения, позволяет определить значения потоковых переменных на входной границе. В конце канала ставится условие постоянного статического давления, необходимое для поддержания постоянного перепада. Разность условных температур стенок выбирается таким образом, чтобы обеспечить максимальный диапазон изменения динамической вязкости поперек канала с начальным значением μ_0 у холодной стенки. Безразмерный профиль скорости (6.8) подсказывает характер подобия при изменении перепада давления, размеров канала, константы вязкости.

Расчеты проводятся в размерных переменных, результаты же представляются в безразмерной (или приведенной) форме без потери общности. Это обусловлено удобством постановки задачи и сложностью выбора безразмерной комбинации физических величин, характерные значения которых однозначно связаны со свойствами течения. В дальнейшем мы будем рассматривать семейство подобных профилей скорости с точкой перегиба при различных числах Рейнольдса Re , соответствующих различным перепадам давления. Данный безразмерный параметр можно определить несколькими различными способами, с учетом того, какая из входящих в него величин зависит от координаты поперек канала:

- $Re_1 = \frac{U^* L_Y \rho_0}{\mu^*}$, где U^* – локальная скорость, L_Y – ширина канала, ρ_0 – характерная плотность, $\mu^* = \mu(y)$ – локальная динамическая вязкость, являющаяся функцией ширины канала;

- $Re_2 = \frac{U L_Y \rho_0}{\mu^*}$, где U – среднемассовая скорость, L_Y – ширина канала, ρ_0 – характерная плотность, $\mu^* = \mu(y)$ – локальная динамическая вязкость, являющаяся функцией ширины канала;

- $Re_3 = \frac{U^* y^* \rho_0}{\mu^*}$, где U^* – локальная скорость, $\mu^* = \mu(y)$ – локальная дина-

мическая вязкость, y^* – расстояние от стенки, причем это число определяется в области $|y^*| \leq 0.15$ и $|L_y - y^*| \leq 0.15$.

Одной из характерных величин является толщина слоя смешения, возникающего вследствие распространения колебаний поперечной скорости, распространяющихся от входного сечения вниз по потоку.

В результате наложения возмущений на основной поток образуются когерентные структуры, рассматриваемые в том смысле, что их время жизни и пространственный размер превосходит интегральный масштаб турбулентности [13]. В выполненных расчетах число Re_2 варьируется в достаточно широких пределах до $Re_2 \sim 10^5$. Таким образом, на отдельных участках сечения должна наблюдаться некоторая иерархия вихрей различных масштабов, возникающих вследствие эволюции когерентных структур.

Частоты наиболее сильных возмущений

Перейдем к описанию поведения течения в случае создания колебаний произвольной частоты для поперечной скорости. Мы будем рассматривать только гидродинамическую моду возмущения, т.е. частота должна быть ограничена максимумом, за которым уже начинается диапазон акустических колебаний (например, $\nu \sim 20$ Гц для воздуха при нормальных условиях) и влияние конечной сжимаемости $\Delta\rho/\rho \propto M^2 = 0.01$.

При поиске резонансной частоты для набора начальных данных задавалось некоторое произвольное значение ν_0 , которое потом корректировалось до ν_2 с учетом процесса распространения возмущений. Расчет проводился на сетке 520×200 .

Приведем подробности алгоритма нахождения частоты наиболее сильных возмущений. Начальный поиск проводился без предположения о характере связи между частотой ν и реализующимися волновыми числами k возмущения, а также скоростными характеристиками течения, определяемыми перепадом давления Δp . Далее мы будем пользоваться обозначением волнового числа в форме $k_j = jk_0$, где $k_0 = 2\pi/L_y$ – минимальное волновое число, j – номер гармоники. Подобное представление отражает факт того, что получаемые пространственные гармоники соответствуют собственным колебаниям расчетной области. Генерация гармоник, связанных с размерами расчетной области (но не зависящих от параметров расчетной сетки), является характерным отличием всех численно решаемых задач от лабораторных и натуральных экспериментов.

Для наименьшего из рассматриваемых $\Delta p = -5 \times 10^{-4}$ в качестве нулевого приближения устанавливается некоторая произвольная частота возмущения $\nu_0 = 0.06$; при этом можно наблюдать эффект достаточно быстрого затухания поперечных возмущений скорости на длине $L_x/L_y \approx 5$ калибров. При уменьшении частоты колебаний, например в два раза, в начальной секции канала также наблюдаются затухающие возмущения, однако на середине длины происходит возбуждение некоторой крупномасштабной гармоники. Рассматривая поле поперечных возмущений скорости и применяя преобразование Фурье к слою с максимальной амплитудой возмущений, можно установить

волновые числа наиболее сильных пространственных гармоник $k_{20} = 20k_0$ (слабая амплитуда на среднем участке), $k_{60} = 60k_0$ (частота основного возбуждения). Предполагая линейную связь между частотой и длиной волны возмущения, уменьшим частоту до $\nu_1 = \nu_0 k_{20}/k_{60}$. После появления нового режима преобразование Фурье дает k_{25} (частота возбуждения) в начальной секции, в то время как на среднем участке генерируется волна k_{14} . Таким образом, частоту необходимо уменьшить до $\nu_2 = \nu_1 k_{14}/k_{25} = 3.733 \times 10^{-3}$. При относительно малых перепадах давления число возбуждаемых мод невелико, поэтому искомая частота определяется достаточно просто.

Перейдем к определению новой частоты при двукратном увеличении давления $\Delta p = -1.0 \times 10^{-3}$, вновь начиная с произвольной частоты $\nu_0 = 1.87 \times 10^{-2}$ (при этом для сохранения числа Маха потока необходимо удвоить скорость звука), тогда наиболее сильным амплитудам соответствуют k_{26} (частота возбуждения) и k_{13} (волна на середине длины канала). Таким образом, частоту нужно изменить до $\nu_1 = \nu_0 k_{13}/k_{26}$, что приводит к появлению большой группы гармоник (амплитуды указаны в скобках): k_3 (5.77×10^{-3}), k_7 (1.34×10^{-2}), k_9 (2.73×10^{-2}), k_{11} (2.01×10^{-2}), k_{14} (2.09×10^{-2}), k_{18} (3.46×10^{-2}), где k_{18} соответствует частоте возбуждения, а k_9 – волне, генерируемой на среднем участке, тогда $\nu_2 = \nu_1 k_9/k_{18}$.

При увеличении перепада давления до $\Delta p = -8.0 \times 10^{-3}$ происходит сильное усложнение спектров, связанное с возбуждением большого количества гармоник. Для поиска частот при больших перепадах давления можно использовать тот факт, что уже найденная функция $\nu_2 = \nu_2(\Delta p)$ является линейной. Это, скорее всего, связано с линейной зависимостью скоростного профиля от перепада давления. Процедура можно ускорить, выбирая в качестве нулевого приближения ν_0 удвоенное значение предыдущей найденной частоты ν_2 с некоторой малой положительной добавкой. Следует обратить внимание, что после изменения частоты возбуждения необходимо убедиться, что гидродинамические возмущения предыдущей частоты были полностью подавлены или вынесены основным течением за пределы расчетной области.

Уравнения схемы «КАБАРЕ» [10] представляются в размерной форме, таким образом, частоты возмущений ν , перепады давлений Δp (см. рис. 6.3), а также шкала скорости (рис. 6.3) приведены в системе СИ.

В сериях расчетов мы рассматривали медленные течения с максимальной продольной скоростью $U \sim 3 \times 10^3$ м/с ($\Delta p = -5 \times 10^{-4}$ Па), отличающиеся очень малой вязкостью в ядре потока для достижения больших характерных чисел Рейнольдса. Указанное обстоятельство помогает увеличить порядок величины физического шага по времени и уменьшить ошибки округления при выполнении операций на ЭВМ.

Вопрос достижения сеточной сходимости для частоты наиболее сильных возмущений отдельно не исследовался, однако, заметим, что при выделенной частоте $\nu_2 = 9.785 \times 10^{-3}$ Гц ($\Delta p = -8.0 \times 10^{-3}$ Па), для которой в дальнейшем обсуждался вопрос сеточной сходимости полей температуры, изменения структуры течения, связанной с изменением номера резонансной гармоники, не отмечается.

Таблица 6.2. Зависимость картины смещения в окрестности точки перегиба от частоты при движении к резонансу из низкочастотной области

Значение частоты в долях резонансной	Картина смещения
$1/5 v_2$	На расстоянии 10 калибров от входа наблюдаются мощные апериодические возмущения, пространственные гармоники наблюдаются слабо
$2/5 v_2$	Разрушения потока на середине длины канала носят слабо периодический характер, пространственная форма возмущений является негармонической (по крайней мере в зоне перегиба профиля скорости). В оконечности трубы иногда наблюдаются небольшие периодические структуры, на которые накладываются хаотические колебания
$3/5 v_2$	Возникают крупные валы с перемешиванием, деформации профиля температуры становятся слабее
$4/5 v_2$	Возникают правильные крупномасштабные структуры, хорошо наблюдается переход нарастания амплитуды из линейной стадии в нелинейную
v_2	Происходит переход к возмущениям гармонической формы, с гребней которых иногда срываются мелкие моли жидкости и уносятся слоями с другой температурой

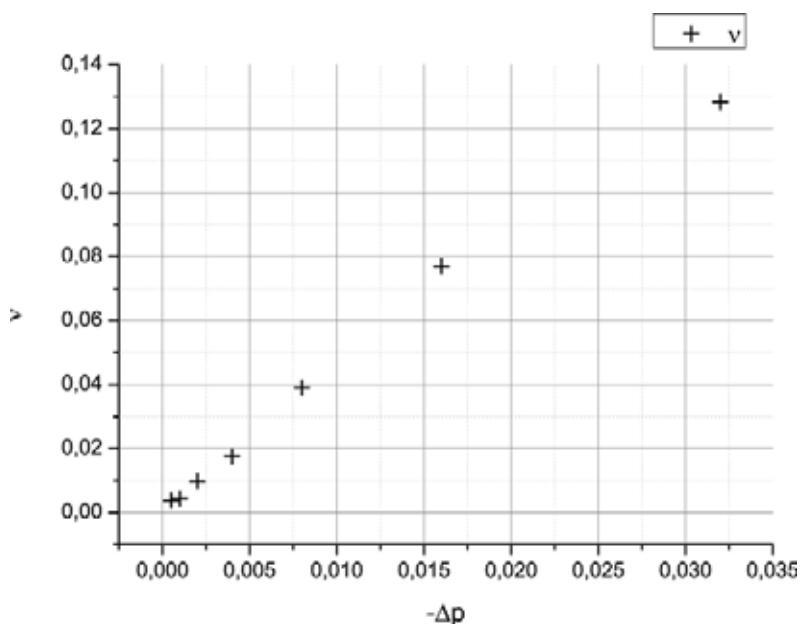


Рис. 6.4. Зависимость частот наиболее сильных возмущений от перепада давления

6.4. ИССЛЕДОВАНИЕ СХОДИМОСТИ РЕШЕНИЯ

Рассмотрим вопрос о сходимости решения (см. распределения характерных чисел на рис. 6.3) на последовательности сгущаемых сеток. Сделанные выводы помогут определить размер сетки, подходящей для массового счета

при различных амплитудах возмущения и значениях числа Прандтля, соотносясь с требованием достаточной точности и ограниченности вычислительных ресурсов.

Результаты серии расчетов, представленные на рис. 6.4, показывают, что вихревые структуры отличаются на конечном участке трубы, причем особенно сильны различия при сгущении сетки от 184 до 256 ячеек поперек канала. В то время как переход от сетки (3) к сетке (4) происходит не столь радикально. На примере расчета на сетке 2048×184 ячеек, качество которых, измеряемое соотношением сторон, существенно лучше, показано, что более детального разрешения вихревых структур не достигается. Стоит также отметить, что крупномасштабные вихри не производят окончательного развала течения, вероятно, процесс «перекачки» энергии от основного течения к возмущению происходит не столь интенсивно.

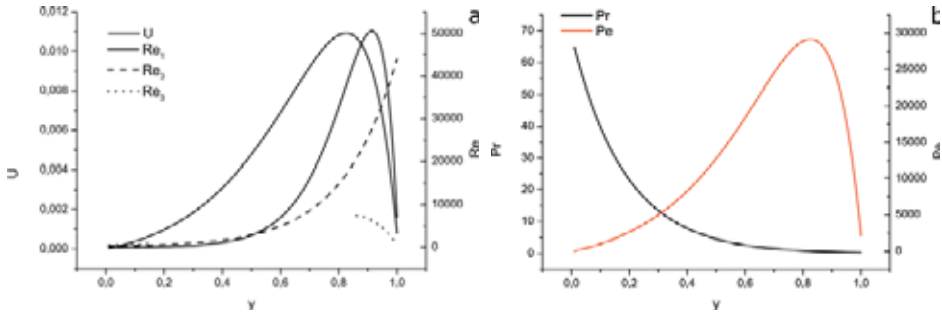


Рис. 6.5. Профиль продольной скорости, чисел Рейнольдса (а), Прандтля и Пекле (б) в поперечном сечении канала

При числах Рейнольдса $Re > 2000$ действительно должен [14] происходить переход к турбулентному течению в трубе, вместе с тем, смешительный переход (mixing transition) имеет место при гораздо больших числах Рейнольдса $Re = 10^4$ и тейлоровском числе Рейнольдса $Re_T = 150-200$ [15]. Объяснение этого факта, возможно, стоит искать в особенностях двумерной турбулентности, возбуждаемой под действием низкочастотного форсинга.

Крупномасштабный захват слоев жидкости с различной температурой происходит на дистанции 10 калибров с образованием больших клубов, что хорошо видно на поле условной температуры. Поперечный перенос T , являющейся «активным» (по воздействию на основное течение) скалярном вследствие термовязкости, особенно существенен в области точки перегиба. Однако и в пристеночной области с большей температурой образуется система вихрей размером, составляющим около $1/3$ размера крупномасштабных «клубов».

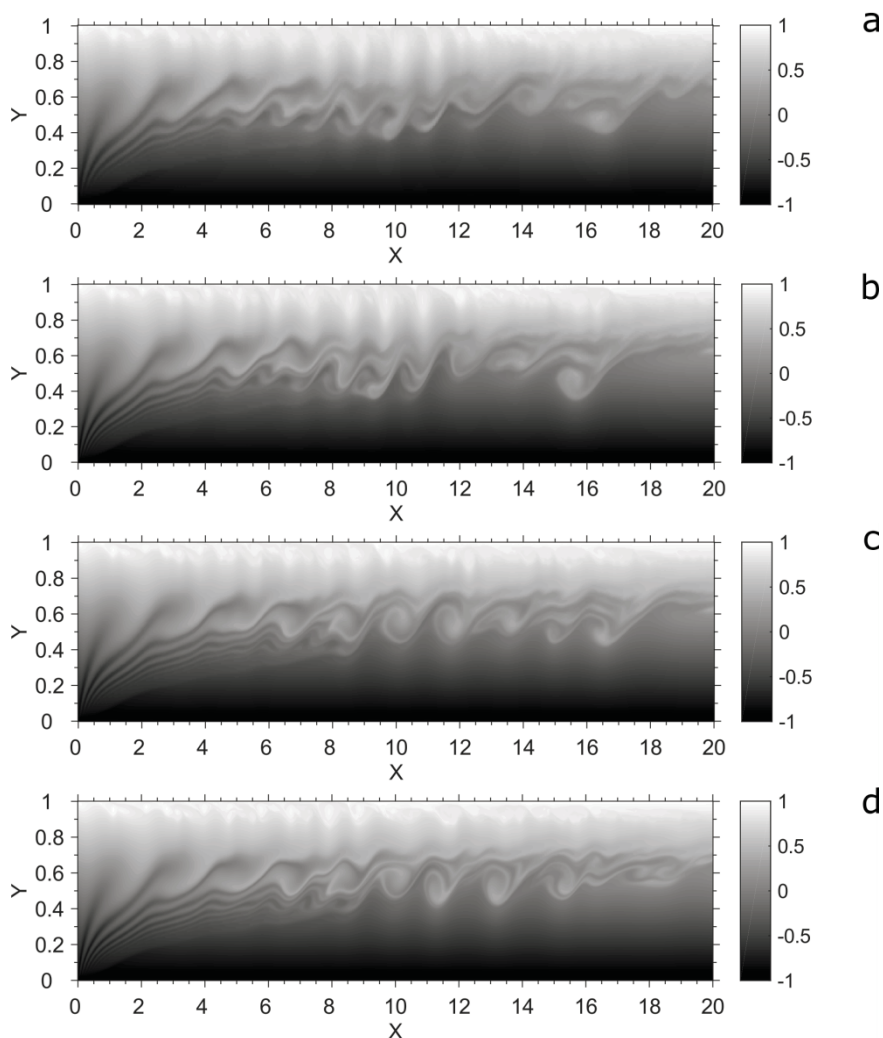


Рис. 6.7. Распределение температуры в безразмерных единицах в момент времени $t = 134.375$. Значение температуры у нижней стенки в безразмерных единицах $T = -1$, у верхней стенки $T = 1$, расчет на сетке: 512×128 (а), 2048×184 (б), 1024×256 (с), 2048×512 (д) ячеек

Ниже приведены поля относительных ошибок консервативной переменной T на различных сетках, взятые в момент времени $t = 134.375$. Характерной особенностью является существенная ошибка ε вычисления захваченных молей менее вязкой жидкости, которые скручиваются в спирали (см. рис. 6.7).

Указанная знакопеременная величина определяется как

$$\varepsilon = \frac{[T]_{fine} - [T]_{coarse}}{[T]_{fine}}, \quad (6.18)$$

где $[T]_{fine}$ и $[T]_{coarse}$ – сеточные функции температуры на более мелкой и грубой сетках соответственно. Задача оказывается достаточно ресурсозатратной, вместе с тем при переходе к более подробным сеткам появления мелко-масштабных вихревых структур не наблюдается.

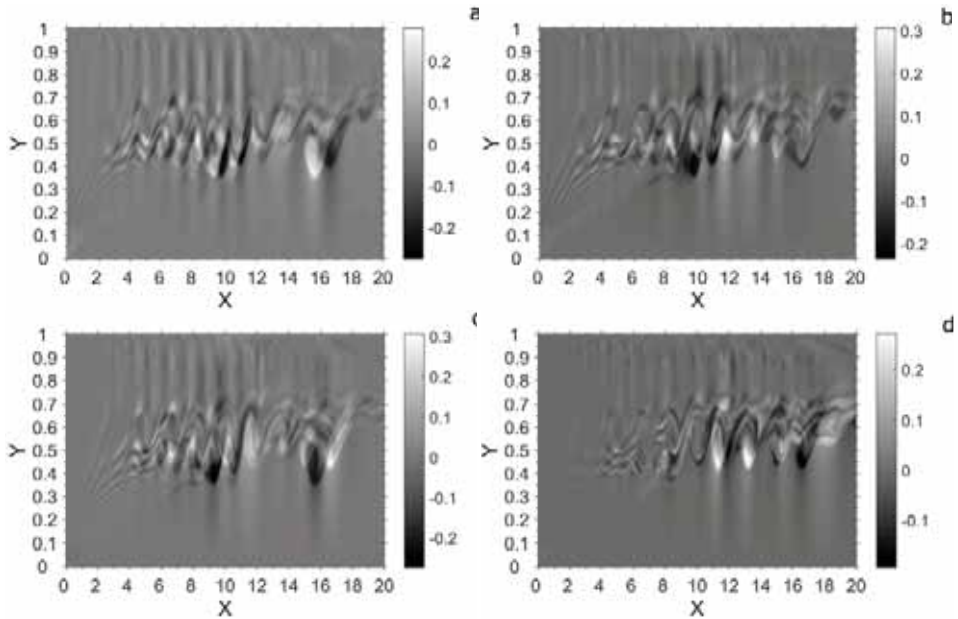


Рис. 6.7. Поле относительной ошибки температуры в момент времени $t = 134.375$ при расчетах с различным количеством ячеек в поперечном сечении канала: сетка (1) относительно сетки (2) (a), сетка (1) относительно сетки (3) (b), сетка (2) относительно сетки (3) (c), сетка (3) относительно сетки (4) (d)

Зависимость относительной ошибки в распределении поля температуры не дает особого оптимизма в вопросе сходимости: действительно, существенное увеличение количества расчетных ячеек по длине канала не слишком сильно повышает точность расчета, напротив, большее влияние имеет количество точек поперек канала, при этом сохраняется достаточно большая ошибка в слое смешения (25 %), что объясняется смещением положений слоев с различной температурой на сгущающихся сетках.

При сравнении сеток (3) и (4) оказывается, что основное различие связано со степенью закрученности «клубов» (billows) жидкости в слое смешения, однако существенного увеличения слоя вовлечения (layer of entrainment) не происходит. Таким образом, адекватным представляется расчет на сетке, содержащей порядка 256 ячеек поперек канала. Это также продиктовано скоростью роста вычислительного объема задачи как 2^3 при измельчении сетки.

Зависимость картины течения от амплитуды

В проводимой серии расчетов в окрестности точки перегиба реализуется переходный режим течения с числом $Re_1^{i*} \approx Re_2^{i*} \approx 2000$ таким, что возмущения, распространяющиеся слева от точки перегиба, должны затухать,

а справа – нарастать. Зависимость амплитуды возмущений описывается формулой * MERGEFORMAT (1). Всего использовалось 5 значений амплитуды $\delta = 0.009375, 0.01875, 0.0375, 0.05, 0.075$. Для получения характеристик о ширине слоя вовлечения производилось осреднение изолиний температуры после завершения процедуры установления течения. Всего использовалось шесть изолиний температуры, пять из которых равноудалены друг от друга и имеют следующее положение относительно нижней стенки: $y/L_y = 0.098, 0.298, 0.498, 0.898$, еще один контур строится в окрестности точки перегиба (далее обозначается как изолиния i^*).

Для самой малой из исследованных амплитуд $\delta = 0.09375$ видимое нарастание возмущения происходит только в зоне точки перегиба, оно достигает максимума при $L_x/L_y \approx 2-6$, а затем затухает на дистанции $L_x/L_y \approx 16$. Вследствие вязкой стратификации средние линии контуров температуры несколько отклоняются в сторону более холодной стенки. Этот процесс особенно заметен на среднем участке течения, относительное смещение средней линии в данном случае не превышает $y_{med} = 0.04$. Наиболее сильное нарастание толщины слоя крупномасштабного смещения соответствует $y = 0.63$ (серый точечный график на рис. 7.8а), причем интенсивность вовлечения в слоях $y = 0.63, y = 0.698, y = 0.898$ обладает некоторым подобием. В зоне высоковязких слоев происходит быстрое гашение амплитуды возмущения, несмотря на резкий начальный рост.

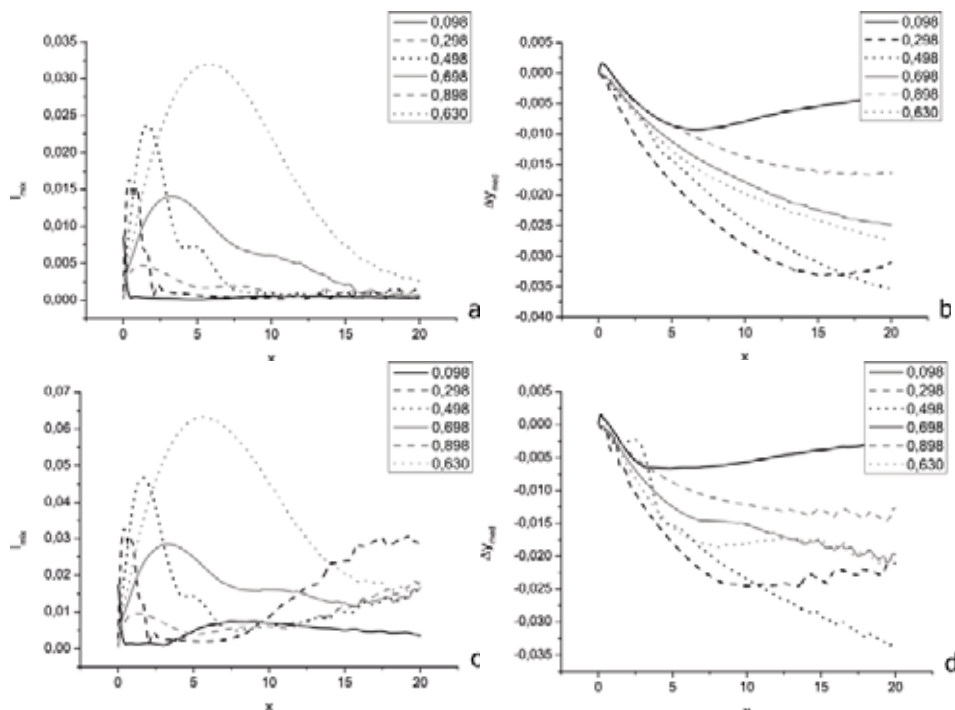


Рис. 6.8. Осредненные значения толщины слоя вовлечения при $\delta = 0.09375$ (а) и $\delta = 0.01875$ (с), а также смещения среднего значения изолинии при $\delta = 0.09375$ (б) и $\delta = 0.01875$ (д) относительно безразмерной начальной ординаты, обозначенной на рисунке

При описании развития неустойчивости в слое смешения, можно использовать понятия абсолютной неустойчивости (*absolute instability*) и конвективной неустойчивости (*convective*) [4], которые реализуются в свободных сдвиговых течениях при различном соотношении скоростей $R = \Delta U / \bar{U}$, где ΔU есть разность скоростей между двумя спутными потоками, \bar{U} – их средняя скорость. Для абсолютно неустойчивых течений развитие возмущения во времени в некоторой точке потока приводит к экспоненциальному росту во всей расчетной области. Напротив, в конвективно неустойчивых течениях перенос возмущения синхронизирован с ростом его амплитуды, в результате чего основной поток остается невозмущенным [16].

Действительно, в окрестности точки перегиба, для которой происходит сначала рост амплитуды слоя смешения, а затем ее последовательный спад, выполняется условие существования конвективной неустойчивости $R < 1.1315$. Для промежуточной амплитуды $\delta = 0.01875$ видимое нарастание возмущения происходит только в зоне точки перегиба и имеет то же самое поведение, что и для меньшей амплитуды. Однако на дистанции ($L_x/L_y \approx 8-16$) происходит рост слоя вовлечения при $y \approx 0.3$ и $y \approx 0.9$ калибра, находящий свое отражение на графиках рис. 6.8b.

При увеличении амплитуды до $\delta = 0.0375$ свертывания возмущения в регулярные «клубы» не происходит: при $L_x/L_y \approx 2$ наблюдается рост амплитуды возмущения с сохранением гармонической формы, затем высота гребня (*ribbon*) остается практически постоянной без вовлечения новых слоев жидкости на отрезке $L_x/L_y \approx 3-8$; в оконечности канала ($L_x/L_y \approx 9-20$) возмущение затухает, что выражается в практически полном рассеянии гребня. При $\delta = 0.0375$ в момент времени $t = 244.0$ (см. рис. 6.7c и 6.7d) начинается развитие слоя смешения в слое $y \approx 0.3$ и в пристеночной области у горячей стенки, где на дистанции 14–20 калибров ко времени $t = 272.548$ начинается сворачивание «клубов» неустойчивости. Это приводит к усилению возмущения во всех слоях и к появлению немонотонности на всех графиках с $L_x/L_y \approx 3-8$, несмотря на то, что возмущение изолинии i^* к этому моменту ослабевает. Осредненное по времени поведение температурных изолиний имеет разную динамику: пристеночная изолиния (у холодной стенки) никуда не смещается, линии слева от точки перегиба сильнее всего волекаются в холодное течение $\Delta u_{med} \approx -0.04$, справа – подобным же образом, но до $\Delta u_{med} \approx -0.04$, отклонение изолинии i^* имеет сильную немонотонность – сначала поток втягивается в область холодного течения, в затем в область горячего. При росте амплитуды возбуждения до $d = 0.05$ на участке 6 калибров начинается сворачивание клубов более горячей и менее вязкой жидкости. Вовлечения более холодной жидкости в ядро потока практически не происходит. На половине длины канала начинается возвратное движение клуба к ядру потока, который при $L_x/L_y \approx 12-15$ практически сливается с жидкостью той же температуры. Одновременно моли холодной жидкости медленно «выдавливаются», в целом же это приводит к уширению слоя смешения в оконечности трубы. Изолинии слоя смешения (см. рис. 6.10) обладают поведением, схожим с предыдущим случаем, однако, значения l_{mix} практически для всех кривых увеличиваются в два раза на дистанции $L_x/L_y > 12$. В области 10 калибров спад становится еще более резким, вследствие бо-

лее быстрого возвратного движения. Графики средних значений изолиний Δu_{med} отличаются схожим поведением, но более подвержены осцилляциям.

При наложении квазирезонансной частоты картина течения после завершения переходных процессов при ($\delta = 0.075$) имеет следующий характер (см. рис. 6.9c и рис. 6.9d): на расстоянии $L_x/L_y \approx 1-2$ происходит рост амплитуды возмущений температурного поля. Чем дальше поперек канала продвигаются слои маловязкой жидкости, тем с меньшей скоростью они движутся в продольном направлении. На участке $L_x/L_y \approx 3$ горячая часть гребня, расположенная ближе к основному ядру потока, начинает обгонять макушку гребня, что приводит к вытягиванию и искривлению структуры вдоль по потоку. Одновременно при $L_x/L_y \approx 4$ нижележащие слои медленно движущейся жидкости оказываются в состоянии противофазы, что приводит к началу возвратного движения. Такой же процесс происходит и в высокоскоростном ядре потока, там более холодные слои жидкости также начинают смещаться в обратном направлении, однако, несколько позже из-за большей вязкости ($L_x/L_y \approx 8-10$). На дистанции 9-11 горячие слои движутся в обратном направлении, приближаясь к ядру потока, и одновременно «выжимают» более холодные, давно вовлеченные слои в область медленного течения. На второй половине канала образуется система медленно сворачивающихся вихрей с характерным размером, равным длине волны основного возмущения. Основная зона смешения при этом составляет 1/3 калибра и располагается не в пристеночной зоне и не в ядре потока, а в окрестности точки перегиба, где и происходит генерация завихренности вследствие неустойчивости.

Для самой большой из исследованных амплитуд в пристеночной области происходит сильнейшее демпфирование толщины слоя смешения (см. рис. 6.9e и рис. 6.9f) на дистанции $L_x/L_y \approx 0.5$ калибра, в то время как соседний слой ($y = 0.298$) после подавления начинает медленно возрастать. Совершенно противоположное поведение наблюдается у горячей стенки, где смешение по своей скорости не уступает ядру потока, однако, осциллирует гораздо меньше. Возможно, это объясняется более мелким масштабом вихревых образований в пристеночной области. Поведение в слоях $y = 0.498$ и $y = 0.063$ отличается крайней немонотонностью, осцилляциями и выбросами с амплитудой порядка $l_{mix} \approx 0.15$. Такие падения l_{mix} происходят в момент совершения слоями с соответствующей температурой, изначально захваченных холодной жидкостью, быстрого возвратного движения к ядру потока (например, при $x \approx 10$ калибров).

Выполнение пространственного преобразования Фурье (см. рис. 6.8) в произвольный момент времени $t = 276.818$ для полей завихренности, энтропии, кинетической энергии потока, а также кинетической энергии возмущений относительно невозмущенного стационарного профиля $1/2 ((U - U_{prof})^2 + V^2)$ демонстрирует наличие некоторых закономерностей, соответствующих свойствам двумерного турбулентного течения. В частности, на уверенно разрешаемом участке спектра ω^2 имеется область с асимптотической k^{-2} .

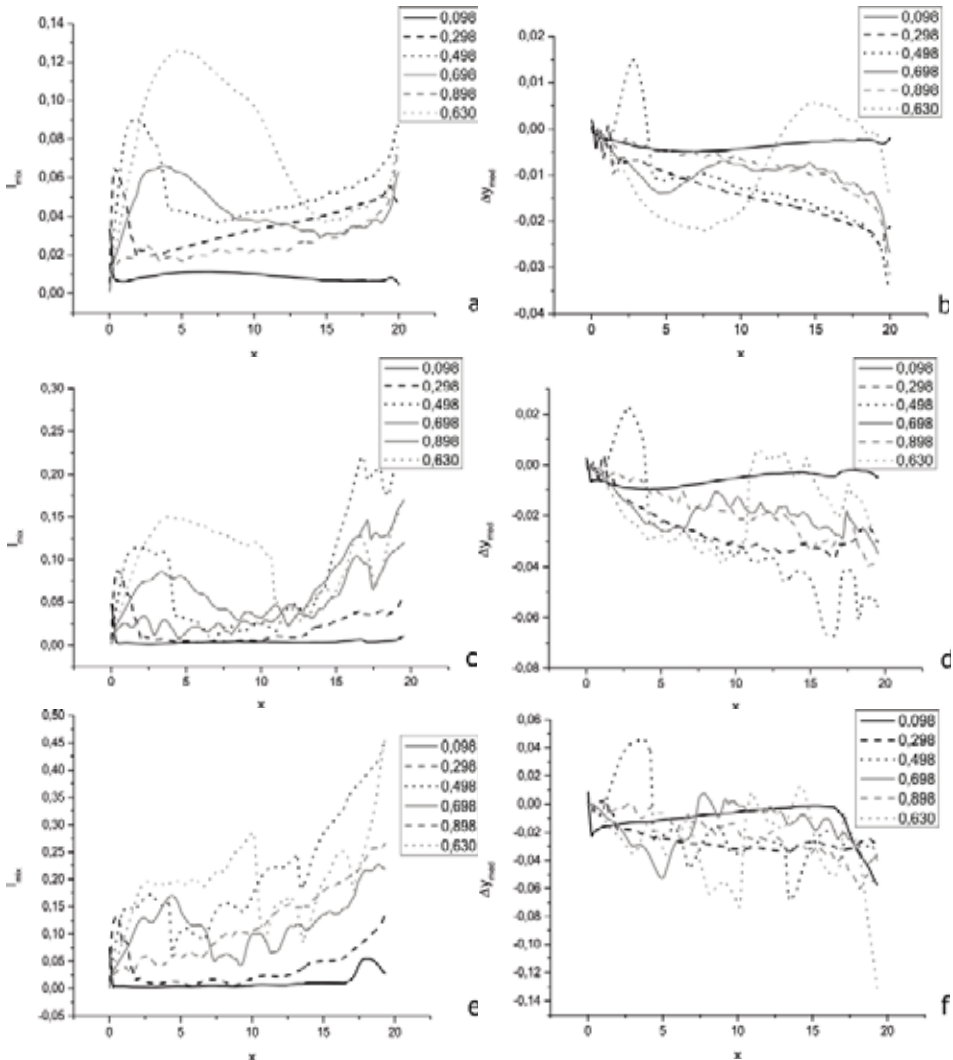


Рис. 6.9. Осредненные значения толщины слоя вовлечения при $\delta = 0.0375$ (а), $\delta = 0.05$ (с) и $\delta = 0.075$ (е), а также смещения среднего значения изолинии при $\delta = 0.0375$ (б), $\delta = 0.05$ (д), и $\delta = 0.075$ (ф) относительно безразмерной начальной ординаты (положения слоя), обозначенной на рисунке

Рассматривая спектр завихренности, можно исходить из предположения о том, что в процессе развития течения существуют области [22], в которых основную роль играет тензор деформаций (гиперболическая область), и те, в которых поведение определяется тензором вращений (эллиптическая область). Гиперболическая область связывается с развитой (однородной и изотропной) турбулентностью, в то время как эллиптические области должны соответствовать когерентным структурам (см. раздел, посвященный преобразованию Вейса и анализу картин завихренности).

Здесь мы сталкиваемся с двояким толкованием термина «когерентные структуры»: с одной стороны, им обозначаются образования, имеющие раз-

мер большой интегральной масштаба турбулентности, с другой – уединенные сгустки завихренности, слабо взаимодействующие с вихрями других масштабов. Так или иначе, эти структуры живут достаточно долго $t \sim 100u/l$, выживая в процессе филаментации. Многие исследователи считают, что появление когерентных структур связано со специфическими свойствами начальных условий. Таким образом, двумерная турбулентность запоминает гораздо больше в сравнении с ее трехмерным аналогом и базовыми гипотезами теории Бэтчелора. Наклон спектра завихренности в логарифмических координатах на рис. 6.8а с некоторой точностью соответствует асимптотике k^{-2} , представляющей собой вклад эллиптических областей [17]. Отсутствие асимптотики k^{-1} , соответствующей турбулентной пелене, скорее всего связано с недостаточным сеточным разрешением. Напротив, наклон спектра кинетической энергии возмущений хорошо согласуется с классической моделью турбулентности – по крайней мере в относительно небольшом интервале разрешаемых масштабов. В «полях» активного скаляра не наблюдается процесс быстрого разрушения мелких вихрей, в отличие от трехмерного случая, где их эволюция происходит очень быстро. Действительно, размерные оценки их времени жизни в двумерном $\frac{u\tau}{l} \sim 1$ и трехмерном случаях $\frac{u\tau}{l} \sim Re^{-1/2}$ принципиально различаются.

6.2.3. Зависимость толщины смещения от числа Прандтля

В серии расчетов для разных чисел Прандтля использовалось самое интенсивное течение из всех рассмотренных, в нем числа Рейнольдса Re_1 и Re_2 на основных участках потока соответствуют течению с развитой турбулентностью. Минимальное число Прандтля, определяемое по максимальной вязкости у холодной стенки приводимой серии расчетов имело значение $Pr = 66.67, 1.334, 6.67 \times 10^{-2}, 3.34 \times 10^{-3}$, что не является достаточно показательным, вследствие резкого изменения вязкости поперек канала.

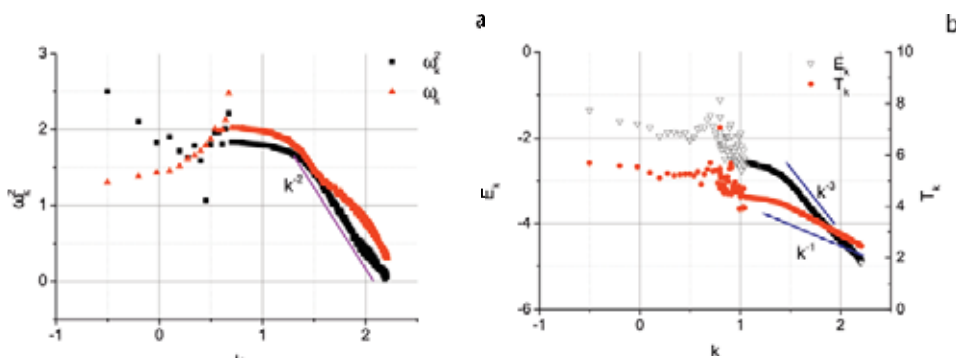


Рис. 6.10. Спектры преобразования Фурье энтропии ω^2 и завихренности ω (а), кинетической энергии возмущений основного профиля скорости и активной примеси (температура T) (б), сплошные линии указывают наклон асимптотик k^{-1} и k^{-3} . Для $k > 1.05$ проводилась фильтрация спектров по методу Савицкого-Голея

Для самого большого числа Прандтля $Pr = 66.67$ на дистанции 2 калибра происходит резкое вовлечение горячего гребня в холодный поток, а затем ($L_x/L_y \approx 6$) резкое сворачивание «клуба». На расстоянии 6 калибров начинается

возвратное движение горячего моля, приводящее к его растяжению (шнурованию) и сдваиванию. Ниже зоны i^* образуется слоистое течение вытянутых молей жидкости с разной температурой, смещающихся к ядру потока.

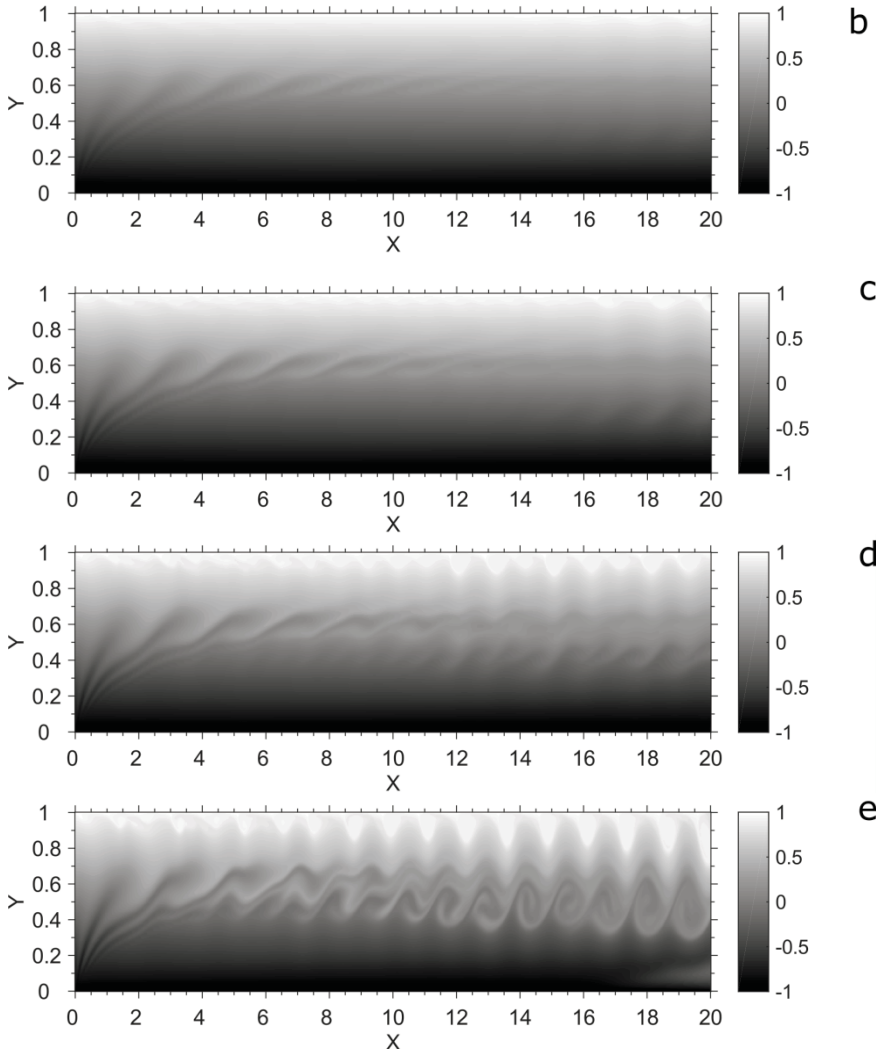


Рис. 6.11. Распределение температуры в безразмерных единицах в момент времени $t = 134.375$ при различных амплитудах: $\delta = 0,009375$ (a), $\delta = 0,01875$ (b), $\delta = 0,0375$ (c), $\delta = 0,05$ (d), $\delta = 0,075$ (e). Значение температуры у нижней стенки в безразмерных единицах $T = -1$, у верхней стенки $T = 1$, расчет на сетке 1024×256 ячеек

На расстоянии 10 калибров от входа образуется регулярная система крупномасштабных клубов, состоящих из образований разной температуры и формы. Для этого же режима характерны самые большие значения слоя вовлечения, в отдельных слоях ($y = 0.63$, $y = 0.49$) достигающие 0.25–0.4 калибра, что свидетельствует об очень мощном процессе смешения. Причем l_{mix} в этом случае на первой половине канала практически не убывает, а на второй постепенно растет, что приводит к удвоению значения l_{mix} на выходе

де. В отличие от меньших чисел Pr рассматриваемое семейство графиков оказывается гораздо меньше подвержено пространственным осцилляциям. При $Pr = 1.334$ на дистанции 2–4 калибра происходит увеличение высоты маловязкого гребня; при $L_x/L_y \approx 4$ начинается сворачивание гребня в вихрь, что уже при $L_x/L_y \approx 6$ становится малозаметным вследствие тепловой диффузии. Горячие слои жидкости не совершают возвратного движения (как в случае числа $Pr = 66.67$ – см. раздел о сходимости), в результате в центральной части потока образуется дорожка молей более теплой жидкости в окружении холодной.

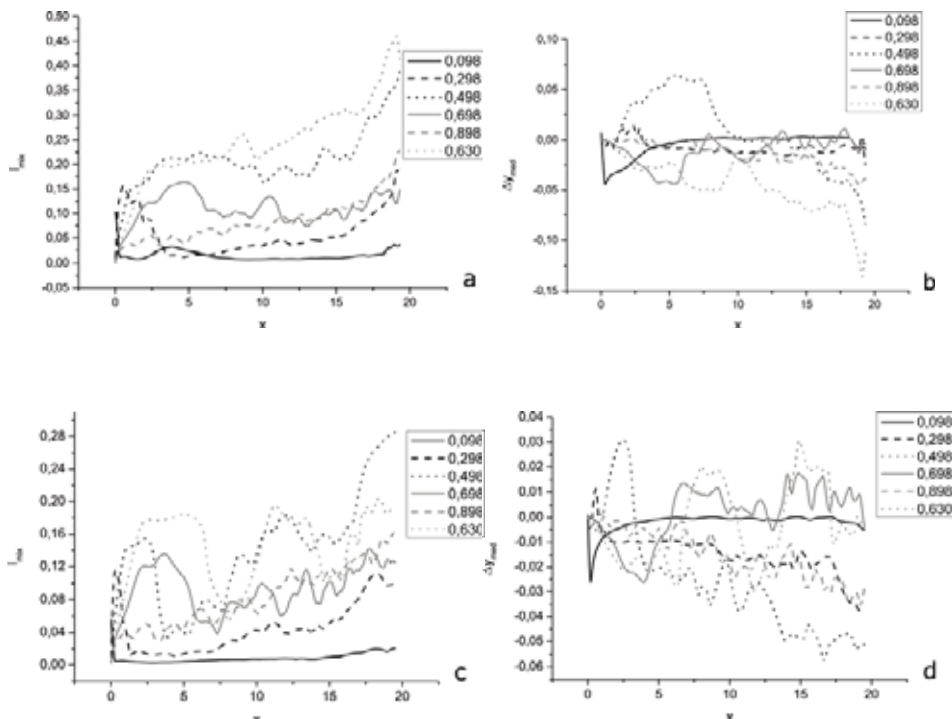


Рис. 6.12. Осредненные значения: толщины слоя вовлечения при $Pr = 66.67$ (a) и $Pr = 1.334$ (c), смещения среднего значения изолинии относительно начальной ординаты для $Pr = 66.67$ (b) и $Pr = 1.334$ (d)

На дистанции $L_x/L_y \approx 10$ –20 происходит рассеяние основания горячего вихря и потеря регулярности формы. Вовлечения холодной жидкости в ядро потока практически не наблюдается. При уменьшении числа Прандтля до $Pr = 6.67 \times 10^{-2}$ рост слоя смешения происходит крайне немонотонно, осцилляции становятся особенно сильными в пристеночной области возле горячей стенки ($y = 0.898$), в ядре потока ($y = 0.898$), в окрестности изолинии $i^* - y = 0.693, 0.498, 0.298$.

Максимальная интенсивность смешения опять приходится на зону i^* , однако в оконечности канала ($L_x/L_y \approx 15$) ей совершенно не уступает ($l_{mix} = 0.15$) горячий пристеночный слой.

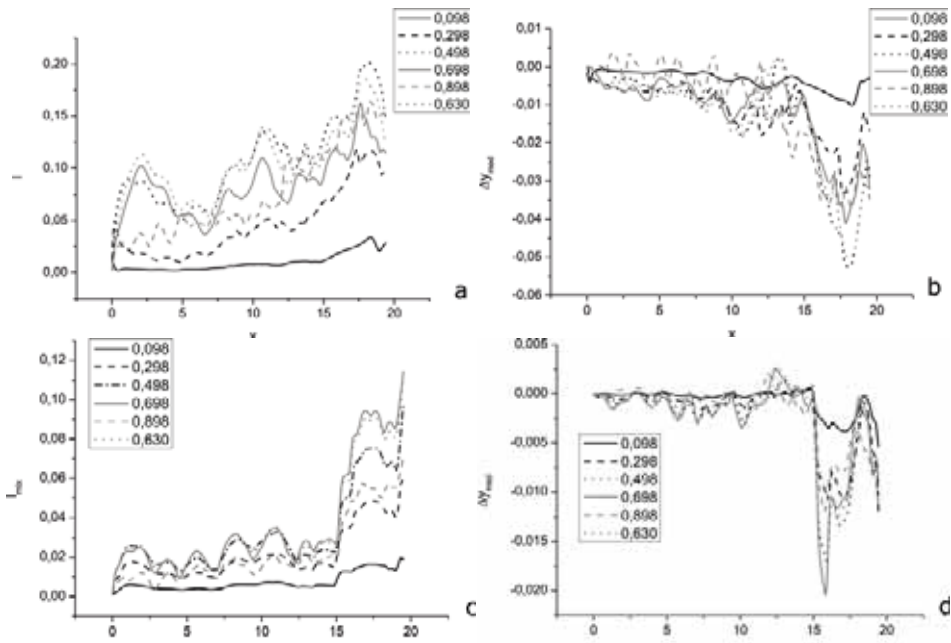


Рис. 6.13. Осредненные значения толщины вовлечения при $Pr = 6.67 \times 10^{-2}$ (а), $Pr = 3.34 \times 10^{-3}$ (с) и отклонения изолиний от положения среднего $Pr = 6.67 \times 10^{-2}$ (b), $Pr = 3.34 \times 10^{-3}$ (d)

Вследствие более сильного теплообмена образования высоких вихрей не происходит, их амплитуда остается практически постоянной по длине канала; кроме того, поле температуры мало отражает процесс эволюции завихренности вследствие быстрого рассеяния температурных неоднородностей. Практически все температурные изолинии отклоняются в область холодной стенки, подвергаясь при этом воздействию сильных осцилляций. При наименьшем $Pr \approx 3.34 \times 10^{-3}$ высокая теплопроводность приводит к уменьшению толщины слоя вовлечения по сравнению с $Pr \approx 6.67 \times 10^{-2}$ до 0.015–0.03 на дистанции 1–15 калибров с резким ростом в 4 раза в оконечности трубы. Связи между полем завихренности и температуры практически не наблюдается.

При достаточно сильных амплитудах $\delta = 0.075$ и $\delta = 0.05$ можно выделить четыре наиболее интересных области течения (см. рис. 6.12):

- пристеночный слой (синий), в котором должна преобладать филаментация и активно эволюционируют мелкие вихри;
- средний слой (ядро потока), где выживают когерентные структуры, имеющие характерную пилообразную форму;
- зона окрестности точки перегиба i^* , в которой $1/4\omega^2 < S_1^2 + S_2^2$ и в крупномасштабных «клубах» превалирует растяжение вовлеченных слоев жидкости разной температуры, несмотря на наличие крупномасштабных вихревых структур.
- несколько ниже точки перегиба также имеется узкий участок, где могут существовать когерентные структуры. Вероятно, он соответствует зоне начала возвратного движения жидкости.

Возможно, что именно возвратно-поступательное движение нитей горячей и холодной жидкости, вызванное «противофазным» движением более быстрого ядра сверху и холодного крыла снизу, и приводит к активному росту $\nabla\omega$, филаментации, которой низкочастотное возбуждение придает характер «клубов». При более мелких амплитудах $\delta \leq 0.0375$ происходит чередование гиперболических и эллиптических областей вследствие форсинга, без каких-либо выраженных областей, протяженных по потоку. Осреднение проводится при различных амплитудах на числе шагов $n = 1 \dots 2 \times 10^6$ по 600–2000 временным слоям уже после установления характерного режима течения. Сетка, использованная при интерполяции, насчитывала $n_x \times n_y = 1024 \times 1024$ ячеек.

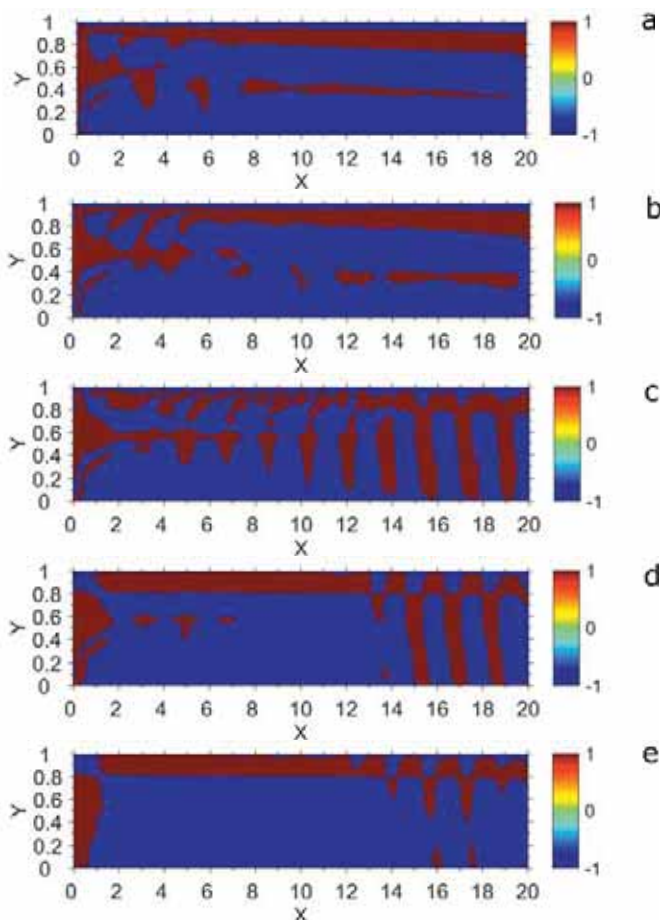


Рис. 6.14. Гиперболические (выделены красным) и эллиптические (выделены синим) зоны в осредненном течении при различных амплитудах возмущения: $\delta = 0.075$ (a), $\delta = 0.05$ (b), $\delta = 0.0375$ (c), $\delta = 0.01875$ (d), $\delta = 0.009375$ (e). Отрицательное подмножество λ_{ω}^2 сведено к значению «-1», а положительное – к «1»

Теперь проследим за изменением расположения гиперболических и эллиптических зон при изменении числа Прандтля (см. рис. 7.15). В этом случае для серии расчетов использовался большой перепад давления и диапазон чисел Рейнольдса Re_1, Re_2 при амплитуде $\delta = 0.075$. Картины распределения знака λ_{0W}^2 имеют те же четыре зоны, которые не меняют своего положения при уменьшении Pr . При анализе временной эволюции поля завихренности строились контурные графики в диапазоне $\omega \in [0.04, 0.07]$, чтобы лучше разрешить область относительно слабо закрученных вихревых образований в окрестности точки i^* . При переходном числе Рейнольдса в зоне i^* характер образующихся вихрей, очевидно, оказывается зависящим от амплитуды δ : в нижней точке отрезка $0.05 \leq \delta \leq 0.075$ уединенные вихри практически сохраняют округлую форму, постепенно теряя интенсивность, вероятно, вследствие диффузии завихренности, в то время как в верхней части интервала, начиная с расстояния 5–6 калибров, происходит активная деформация вихря, «пятна» (patches) завихренности растягиваются в нити в середине слоя $y \approx 0.4$ –6 и сжимаются у его границ. В этом случае влияние вязкой диссипации начинает сказываться на $L_x/L_y \geq 13$.

Ядру потока, а также точке перегиба соответствуют зоны чисел Рейнольдса $Re_{1,2}$, характерные для развитого турбулентного течения, что позволяет говорить о проявлении «вмороженности» линий завихренности в поток, противоположный процесс наблюдается для температуры T при последовательном увеличении Pr .

Как уже отмечалось выше, связь между полями завихренности и температуры теряется. Диапазоны завихренности в зоне i^* практически совпадают. Процесс деформации вихрей оказывается независимым от числа Pr , если $Pr \geq 1.334$: филаментация ядра вихря происходит во второй половине канала с образованием большого числа мелких пятен завихренности, также подверженных растяжению. Зачастую шнурование вихря оказывается достаточно сильным, что, однако, не приводит к его разрушению. При увеличении Pr происходит уширение контуров завихренности, соответствующих нижней части диапазона ($\omega \approx 0.3$).

Связь между образующимся двойным каскадом и когерентными структурами остается не до конца выясненной. Так, иногда предполагается, что образование обратного каскада энергии может быть связано со слиянием вихрей одинакового знака (по-другому – одинаково закрученных вихрей), а их филаментация – с механизмом образования прямого каскада ω^2 . Однако эта идея не оказалась сколько-нибудь плодотворной [21]. Возможность существования когерентных структур на различных масштабах также является вопросом. В случае уравнения Эйлера для достаточно больших чисел Рейнольдса можно связать тензорные величины в критерии Вейса ($\omega, S, \nabla u$) со свойствами – якобиана – матрицы для градиента давления. Таким образом, критерий Вейса оказывается применим только в тех областях, где поле давления имеет существенную пространственную кривизну (в расчетах [21] эта зона не превышала 30 % от всей области). К зонам течения, где гипотеза Вейса верна, следует относить ядра крупных вихрей, а также окрестность седловых точек между одинаково закрученными вихрями. Подобная картина наблюдается и в рассматриваемом течении в зоне i^* : здесь

имеется система одинаково закрученных вихрей с достаточно устойчивыми ядрами, которые затем деформируются ниже по течению.

Выводы

Профиль скорости ТВЖ, обладающий точкой перегиба, оказывает решающее влияние на процесс крупномасштабного вовлечения, причем сам этот процесс будет усиливаться по мере пространственного развития течения и напрямую не связан с генерацией возмущений и завихренности в пристеночном слое. Резонансная (квазирезонансная) частота оказывается линейной функцией перепада давления. Получение картин полей гидродинамических переменных является ресурсозатратной задачей, это связано с ошибками вычисления положения жидких молей с различной температурой, а также медленностью процесса установления стационарного режима течения. Слой вовлечения оказывается зависящим в большей степени от амплитуды возмущения δ , чем от числа Прандтля Pr . Причем при увеличении амплитуды происходит переход от режима конвективной неустойчивости к режиму абсолютной неустойчивости, изменение числа Pr приводит к тому, что процесс эволюции активного скаляра становится независимым от поля завихренности. Применение критерия Окубо-Вейса позволяет выделить характерные гиперболические и эллиптические зоны в течении, связанные с тем, какой из тензоров – тензор деформации или завихренности – преобладает в потоке, что может приводить к активной филаментации турбулентной пелены или к сохранению когерентных структур некоторого масштаба.

6.3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНВЕКЦИИ МАСЛА В БАКЕ ТРАНСФОРМАТОРА НА ПАКЕТЕ FLOW VISION

Для математического моделирования физических процессов, протекающих при естественной конвекции масла в баке трансформатора, используется программный комплекс FlowVision. Для моделирования базовой конструкции трансформатора и ее модификации, включающей статическую защиту, используется однофазная модель. Относительно небольшие перепады плотности масла в силовом трансформаторе позволяют моделировать подъемную силу в приближении Буссинеска. В данной работе используется линейная зависимость плотности масла от температуры. Решаются следующие уравнения:

6.3.1. Математические модели

В данном разделе приводятся две математические модели течения и теплопереноса в маслонаполненном автотрансформаторе:

- а) однофазная,
- б) двухфазная.

Однофазная модель используется при моделировании процессов в базовом автотрансформаторе и в автотрансформаторе, снабженном демпферной защитой. Двухфазная модель используется при моделировании процессов в автотрансформаторе, снабженном динамической защитой.

Однофазная модель

В рамках данной модели численно интегрируются следующие уравнения:

Уравнение неразрывности

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0. \quad (6.19)$$

Уравнение импульсов

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{V})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V} \mathbf{V}) = \nabla \cdot \left(-p \hat{\mathbf{I}} + \hat{\mathbf{\tau}}_{eff} \right) + \rho \mathbf{g}. \quad (6.20)$$

Здесь

$$\mathbf{V} \mathbf{V} = \left\{ \begin{array}{ccc} V_x V_x & V_y V_x & V_z V_x \\ V_x V_y & V_y V_y & V_z V_y \\ V_x V_z & V_y V_z & V_z V_z \end{array} \right\}, \quad (6.21)$$

$$\hat{\mathbf{\tau}}_{eff} = (\mu + \mu_t) \left(2\mathbf{S} - \frac{2}{3}(\nabla \cdot \mathbf{V}) \hat{\mathbf{I}} \right), \quad (6.22)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} (\nabla_j V_i + \nabla_i V_j). \quad (6.23)$$

Уравнение для энтальпии и выражение для потока тепла

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V} h) = -\nabla \cdot \mathbf{J}_{q,eff} + \frac{dP}{dt} + \hat{\mathbf{\tau}} : \mathbf{S} + \rho \varepsilon + Q_{int}, \quad (6.24)$$

$$\mathbf{J}_{q,eff} = - \left(\frac{\lambda}{c_p} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \nabla h. \quad (6.25)$$

В твердом теле уравнение энергии, с учетом анизотропного теплопереноса, принимает вид:

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} = -\nabla \cdot \mathbf{J}_{q,eff} + Q_{int}, \quad (6.26)$$

$$\mathbf{J}_{q,eff} = -\mathbf{A} \frac{\lambda}{c_p} \nabla h. \quad (6.27)$$

Уравнения состояния масла:

$$\rho = \rho(p, T), \quad (6.28)$$

$$h = h_0(298.15) + \int_{298.15}^T c_p(T) dT. \quad (6.29)$$

Уравнения стандартной k - ε модели (для турбулентной энергии и скорости ее диссипации):

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla(\rho V k) = \nabla \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right) + \rho(P_k + G_k) - \rho \varepsilon, \quad (6.30)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla(\rho V \varepsilon) = \nabla \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right) + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \rho(P_k + G_k) - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}, \quad (6.31)$$

$$P_k = \nu_t S, \quad (6.32)$$

$$S = 2 \sum_{i,j} e_{ij} e_{ij}, \quad (6.33)$$

$$G_k = \nu_t \frac{\beta}{Pr_t} \mathbf{g} \nabla T. \quad (6.33)$$

Турбулентная вязкость:

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}. \quad (6.34)$$

Параметры стандартной k - ε модели:

$$\sigma_k = 7.0, \quad \sigma_\varepsilon = 7.3, \quad C_\mu = 0.09, \quad C_{\varepsilon 1} = 7.44, \quad C_{\varepsilon 2} = 7.92. \quad (6.35)$$

Уравнения описывают:

- вынужденную конвекцию;
- свободную конвекцию;
- турбулентность;
- конвективно-диффузионный теплоперенос в жидкости (масле);
- диффузионный теплоперенос в твердом теле.

Дополнительно задаются:

- объемное тепловыделение в обмотках и магнитопроводе;
- условия теплового сопряжения на поверхностях обмоток и сердечника,
- анизотропная теплопроводность в обмотках;
- подсеточная модель зазора, позволяющая не разрешать расчетной сеткой узкие каналы.

Реализованная в ПАК методология численного интегрирования уравнений, описывающих турбулентное течение жидкости и теплоперенос, основывается на методе конечных объемов. Данный метод предполагает интегрирование уравнений в частных производных по объемам ячеек расчетной сетки. Разработанный численный алгоритм [1, 2] использует идею расщепления системы уравнений Навье-Стокса (уравнений неразрывности и импульсов) на уравнение для скорости и уравнение для дав-

ления. Интегрирование уравнений по времени производится неявным методом.

Двухфазная модель

Для некоторых вариантов моделирования ВМЭО рассматривалось двухфазное течение жидкости (масла) и второй – газовой или конденсированной фазы. Совместное движение масла и второй фазы (газа, твердых частиц) моделируется в рамках эйлера подхода, предполагающего, что несущая и дисперсная фазы – взаимопроникающие континуумы [Нигматуллин].

Общие соотношения для объемных долей фаз:

$$\varphi_c + \varphi_d = 1, \quad (6.36)$$

$$\nabla\varphi_c + \nabla\varphi_d = 0. \quad (6.37)$$

Интегрируются уравнения переноса массы, импульса и энергии для несущей (масло) и дисперсной (газ) фаз, а также – уравнения для турбулентной энергии несущей фазы и скорости ее диссипации.

Закон сохранения массы

Дисперсная фаза:

$$\frac{\partial(\phi_d \rho_d)}{\partial t} + \nabla \cdot (\phi_d \rho_d \mathbf{V}_d) = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_{t,d}}{Sc_{t,d}} \nabla \phi_d \right). \quad (6.38)$$

Турбулентная вязкость газовой фазы в виде пузырьков моделируется следующим образом [3]:

$$\mu_{t,d} = \frac{\rho_d}{\rho_c} \mu_{t,c}. \quad (6.39)$$

Испарение масла, дробление и слияния пузырей не учитываются.

Уравнение (6.19), по сути, является комбинацией двух уравнений: для концентрации пузырьков и их средней массы. Предлагаемая математическая модель включает уравнение для средней массы пузырей M_d в данной точке пространства:

$$\frac{\partial M_d}{\partial t} + \nabla \cdot (M_d \mathbf{V}_d) = 0. \quad (6.40)$$

Средняя масса пузырей и локальная плотность газа определяют их средний диаметр. Решение уравнения (6.40) позволяет моделировать движение пузырей разных размеров, выпускаемых из разных входов, в рамках одной дисперсной фазы.

Несущая фаза:

Объемная доля несущей фазы определяется из соотношения (6.5).

Закон сохранения импульса

Дисперсная фаза:

$$\frac{\partial(\phi_d \rho_d \mathbf{V}_d)}{\partial t} + \nabla \cdot (\phi_d \rho_d \mathbf{V}_d \mathbf{V}_d) = -\phi_d \nabla p + \nabla \cdot (\phi_d \hat{\boldsymbol{\tau}}_{t,d}) + \phi_d \rho_d \mathbf{g} + \quad (6.41)$$

$$+ \phi_d \frac{3}{4} \frac{\rho_c}{d} C_D |\mathbf{V}_c - \mathbf{V}_d| (\mathbf{V}_c - \mathbf{V}_d),$$

$$\tau_{t,d,ij} = \mu_{t,d} \left(\frac{\partial V_{d,i}}{\partial x_j} + \frac{\partial V_{d,j}}{\partial x_i} \right). \quad (6.42)$$

Соотношение для коэффициента сопротивления круглых пузырей взято из [4]:

$$C_D = \frac{24}{Re_d} (1 + 0.15 Re_d^{0.687}), \quad (6.43)$$

$$Re_d = \frac{|\mathbf{V}_c - \mathbf{V}_d| d}{\nu_c}. \quad (6.44)$$

Несущая фаза:

$$\frac{\partial(\phi_c \rho_c \mathbf{V}_c)}{\partial t} + \nabla \cdot (\phi_c \rho_c \mathbf{V}_c \mathbf{V}_c) = -\phi_c \nabla p + \nabla \cdot (\phi_c \hat{\boldsymbol{\tau}}_{c,eff}) + \phi_c \rho_c \mathbf{g} - \quad (6.45)$$

$$- \phi_d \frac{3}{4} \frac{\rho_c}{d} C_D |\mathbf{V}_c - \mathbf{V}_d| (\mathbf{V}_c - \mathbf{V}_d),$$

$$\tau_{eff,c,ij} = \mu_{eff,c} \left(\frac{\partial V_{c,i}}{\partial x_j} + \frac{\partial V_{c,j}}{\partial x_i} \right). \quad (6.46)$$

Эффективная вязкость масла $\mu_{eff,c}$ определяется ниже (см. выражение (6.58)).

Закон сохранения энергии

Дисперсная фаза:

$$\frac{\partial(\phi_d \rho_d h_d)}{\partial t} + \nabla \cdot (\phi_d \rho_d \mathbf{V}_d h_d) = \frac{d}{dt} (\phi_d P) + \nabla \cdot \left(\frac{\mu_{t,d}}{Pr_{t,d}} \nabla h_d \right) + \phi_d \frac{6}{d} q_{c \rightarrow d}. \quad (6.47)$$

Удельный поток энергии от несущей фазы к дисперсной $\dot{q}_{c \rightarrow d}$ моделируется следующим образом [5]:

$$q_{c \rightarrow d} = Nu_d \frac{\lambda_c}{d} (T_c - T_d). \quad (6.48)$$

Несущая фаза:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\phi_c \rho_c h_c)}{\partial t} + \nabla \cdot (\phi_c \rho_c \mathbf{V}_c h_c) = \frac{d}{dt}(\phi_c P) + \nabla \cdot \left(\phi_c \left(\frac{\lambda_c}{C_{p,c}} + \frac{\mu_{t,c}}{Pr_{t,c}} \right) \nabla h_c \right) + \\ + \phi_c \left(\sum_{i,j=1}^3 \tau_{c,ij} e_{c,ij} + \rho_c \varepsilon_c \right) - \varphi_d \frac{6}{d} q_{c \rightarrow d}. \end{aligned} \quad (6.49)$$

Двухфазная модель турбулентности

Уравнения для турбулентной энергии жидкости и скорости ее диссипации:

$$\frac{\partial(\phi_c \rho_c k_c)}{\partial t} + \nabla \cdot (\phi_c \rho_c \mathbf{V}_c k_c) = \nabla \cdot \left(\phi_c \frac{\mu_{eff}}{\sigma_k} \nabla k_c \right) + \phi_c \rho_c (P_k + G_k - \varepsilon_c) + Q_{k,d}^{turb}, \quad (6.31)$$

$$\frac{\partial(\phi_c \rho_c \varepsilon_c)}{\partial t} + \nabla \cdot (\phi_c \rho_c \mathbf{V}_c \varepsilon_c) = \alpha_c \nabla \cdot \left(\phi_c \frac{\mu_{eff}}{\sigma_\varepsilon} \nabla \varepsilon_c \right) + \phi_c \rho_c \frac{\varepsilon_c}{k_c} [C_{\varepsilon 1} (P_k + G_k) - C_{\varepsilon 2} \varepsilon_c] + Q_{\varepsilon,d}^{turb}. \quad (6.50)$$

Здесь

$$P_k = \nu_{t,c} S, \quad (6.51)$$

$$G_k = \nu_{t,c} \frac{\beta}{Pr_t} \mathbf{g} \nabla T, \quad (6.52)$$

$$S = \sum_{i,j=1}^3 \frac{\partial V_{ci}}{\partial x_{cj}} \left(\frac{\partial V_{ci}}{\partial x_{cj}} + \frac{\partial V_{cj}}{\partial x_{ci}} \right). \quad (6.53)$$

Дополнительные члены за счет пузырей моделируются следующим образом [6]:

$$Q_{k,d}^{turb} = -\varphi_d \mathbf{F}_{drag} (\mathbf{V}_c - \mathbf{V}_d), \quad (6.54)$$

$$Q_{\varepsilon,d}^{turb} = C_{\varepsilon 3} \frac{Q_{k,d}^{turb}}{\tau}, \quad (6.55)$$

$$C_{\varepsilon 3} = \frac{0.74}{\varphi_d^{1/3}}, \quad (6.56)$$

$$\tau = \left(\frac{d}{\varepsilon_c} \right)^{1/3}. \quad (6.57)$$

Эффективная вязкость жидкой фазы вычисляется в рамках модели Сато [7], предложенной для пузырьковых течений:

$$\mu_{eff,c} = \mu_c + \mu_{t,c} + \mu_{BL}, \quad (6.58)$$

$$\mu_{t,c} = \rho_c C_\mu \frac{k_c^2}{\varepsilon_c}, \quad (6.59)$$

$$\mu_{BL} = C_s \rho_c \varphi_d |V_c - V_d|, \quad (6.60)$$

$$C_s = 0.6.$$

CAD модели маслонаполненного автотрансформатора

В данном разделе представлены созданные упрощенные и полные CAD модели маслонаполненного высоковольтного автотрансформатора IV габарита:

- без демпферной и динамической защит;
- с демпферной защитой;
- динамической защитой.

Программный комплекс FlowVision работает на компьютерах, имеющих гетерогенную параллельную архитектуру, совмещающая межузловое MPI-распараллеливание с распараллеливанием по потокам в узле, как на компьютере с общей памятью. Использование смешанного распараллеливания позволяет добиться хорошего масштабирования при работе на большом количестве процессоров [49, 50].

6.3.2. Геометрическая модель трансформатора

На основе данных, предоставленных изготовителем трансформаторов, была создана модель трансформатора. В предоставленной модели охлаждение происходит за счет естественной конвекции через навесные радиаторы и стенки бака трансформатора. Бак с внешними радиаторами составляет основу расчетной модели (см. рис. 6.15), в которую затем добавляется активная часть.

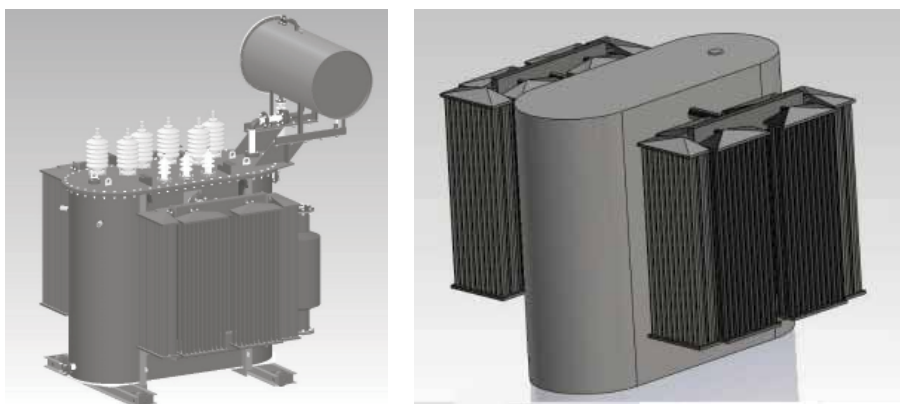


Рис. 6.15. Бак трансформатора с радиаторами: а) внешний вид, б) внутренний объем

Активная часть силового трансформатора состоит из магнитопровода и катушек (см. рис. 6.16).

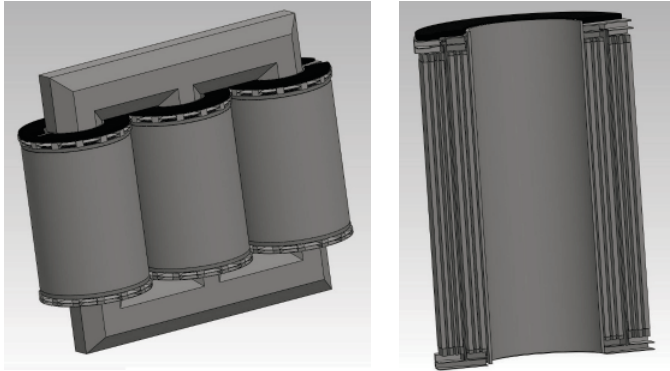


Рис. 6.16. а) Активная часть трансформатора и б) сечение катушки

Катушка трансформатора состоит из обмоток высокого и низкого напряжения, стабилизирующих обмоток, изоляционных обмоток, торцевых изоляторов для катушки и отдельных обмоток. Между обмотками оставлены зазоры для циркуляции масла. Торцевые изоляторы спроектированы таким образом, чтобы не перекрывать свободного тока охлаждающей жидкости к тепловыделяющим обмоткам и от них.

Статическая защита трансформатора (см. рис. 6.17) состоит из пластин, закрепленных в баке трансформатора. Пластины изготовлены из специального материала.

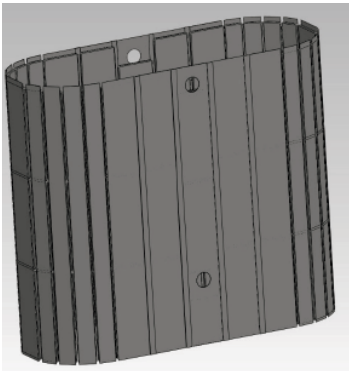


Рис. 6.17. Внешний вид статической защиты

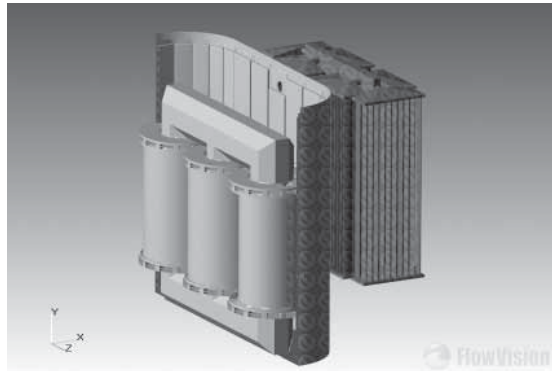


Рис. 6.18. Расчетная область силового трансформатора с элементами защиты от взрыва

Они крепятся к баку трансформатора с определенным технологическим зазором, который позволяет маслу протекать рядом со стенкой бака трансформатора, отдавая стенке тепло. В рассматриваемой модели между пластинами и стенкой бака трансформатора оставлен зазор в 10 мм, обеспечивающий конвективный теплообмен.

6.3.3. Расчетная модель трансформатора

Расчетная область (см. рис. 6.18) состоит из нескольких подобластей:

- «Масло» – внутренний объем бака, не занятый элементами трансформатора;
- «Изолятор» – теплоизолирующие элементы трансформатора;
- «Сталь» – магнитопровод;
- «Медь» – обмотки высокого и низкого напряжения;
- «Защита» – пластины статической защиты.

На общих границах подобластей задается сопряженное граничное условие для уравнивания энергии. В подобластях «Сталь» и «Медь» задается объемное тепловыделение – объемные источники тепла, моделирующие тепловыделение в соответствующих элементах работающего трансформатора. Опорные величины в расчете следующие.

Температура окружающей среды: $T = 293$ К.

Давление окружающей среды $p = 101000$ Па.

Исследование сеточной сходимости решения для конструкции силового трансформатора со статической защитой было проведено на трех сетках: грубой (1384322 ячеек), средней (2820112) (см. рис. 6.19) и подробной (5698470). Для генерации подробной сетки задавались первый и второй уровни адаптации во всех узких зазорах. Таким образом, подробная сетка полностью разрешает зазоры, присутствующие в трансформаторе.

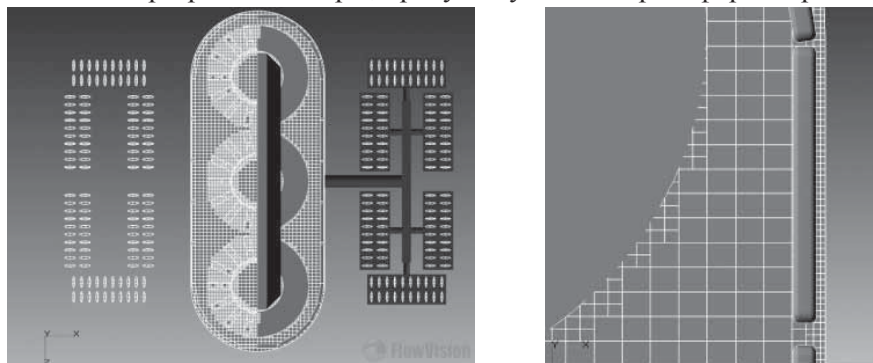


Рис. 6.19. Средняя расчетная сетка

Из результатов (см. таблица 6.3) видно, что использование средней расчетной сетки (2820112 ячеек) не приводит к большой потере точности решения, при этом время интегрирования уравнений на этой сетке значительно меньше, чем на подробной.

Таблица 6.3. Сеточная сходимость модели силового трансформатора

	Грубая сетка	Средняя сетка	Подробная сетка
Средняя температура масла в баке, °С	32.6	30.51	30.02
Максимальная температура масла в баке, °С	38.63	37.31	35.93
Максимальная температура в обмотке, °С	40.53	37.8	37.31

Результаты расчетов для моделирования заводских испытаний

Для верификации построенной модели было проведено моделирование заводских испытаний трансформатора [5]. Тепловые испытания трансформатора состоят из нескольких этапов:

- 1) испытание холостого хода рабочим напряжением – для измерения потерь в магнитопроводе.
- 2) испытание короткого замыкания рабочим током – для измерения потерь на омическом сопротивлении обмоток.
- 3) испытание короткого замыкания эквивалентным током, при котором потери на омическом сопротивлении обмоток равны сумме тепловых потерь.

Первые два испытания дают представление о потерях в трансформаторе в рабочем режиме. Их результаты: 4,9 кВт для магнитопровода и 26,04 кВт для обмоток. Эти данные необходимы для моделирования штатной работы трансформатора.

Третье испытание воспроизводит рабочий режим трансформатора по тепловой нагрузке. Для получения тепловыделения в 30,94 кВт на обмотки потребовалось подать ток в 239,74 А. В этом эксперименте измерялась температура верхних слоев масла. Ее значение составило 58,7 градуса относительно температуры окружающей среды.

Предельное значение измеренной температуры для каждого типа трансформатора указано в [5]. Нужно отметить, что при конструировании новой модели трансформатора максимальная температура масла обычно рассчитывается по инженерным методикам [8, 9], не учитывающим возможность появления локальных перегретых зон. Вычислительная гидромеханика (ВГД) и, в частности, программный комплекс (ПК) FlowVision позволяет рассчитать распределение температуры во всем объеме трансформатора. Соответственно, конструктор получает возможность принять меры для устранения перегрева.

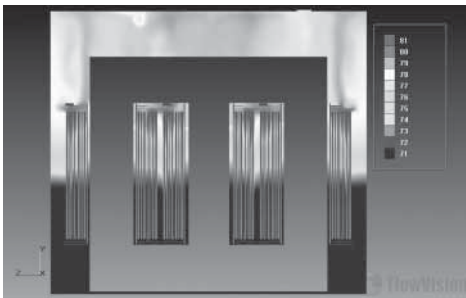


Рис. 6.20. Распределение температуры масла в баке силового трансформатора при испытании короткого замыкания эквивалентным током

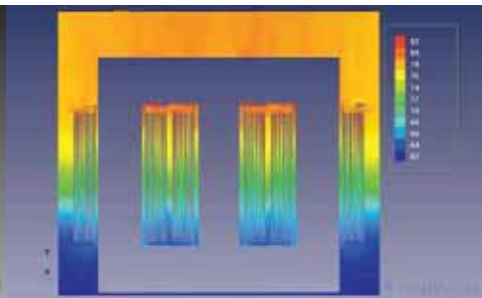


Рис. 6.27. Распределение температуры масла в баке силового трансформатора в рабочем режиме

Из результатов моделирования третьего этапа заводских тепловых испытаний (см. рис. 6.21) видим, что рассчитанное значение температуры верхних слоев масла равно 78,5 °С, или 58,5 градуса относительно окружающей среды (температура окружающей среды в расчете принималась равной

20 °С). Данное значение с хорошей точностью согласуется с экспериментальным. Средняя температура масла по всему объему бака составила 72,6 °С. И хотя для полной верификации необходимо провести более подробные измерения и дополнительные расчеты, полученные результаты говорят о надежности предсказаний с использованием ВГД ПК FlowVision.

Для моделирования штатной работы трансформатора в магнитопроводе и обмотках задаются тепловыделения, равные потерям, полученным в ходе первых двух этапов заводских тепловых испытаний трансформатора.

Как показывают результаты расчета, температура верхних слоев масла изменилась не сильно, и находится в диапазоне от 78 до 80 °С. Однако в рабочем режиме распределение температуры верхних слоев масла стало более неоднородным в результате тепловыделения в магнитопроводе. Средняя температура в баке составила 72,7 °С, что крайне незначительно отличается от данной величины в испытании короткого замыкания эквивалентным током.

Для определения максимального влияния статической защиты на процессы теплообмена в трансформаторе на боковой поверхности бака трансформатора установлено адиабатическое граничное условие.

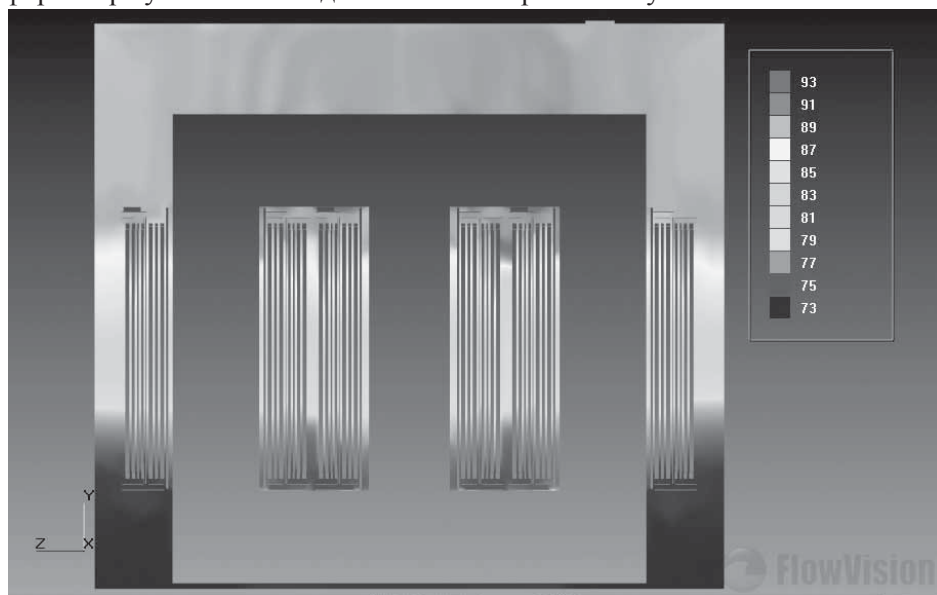


Рис. 6.22. Распределение температуры масла в баке силового трансформатора в рабочем режиме с адиабатическим граничным условием на боковой стенке трансформатора

Из результатов расчета (см. рис. 6.23) видно, что температура верхних слоев масла теперь находится в диапазоне от 89 до 91 °С. Таким образом, при исключении боковой стенки трансформатора из теплообмена с окружающей средой (весь теплообмен идет через внешние радиаторы), температура верхних слоев возрастает примерно на 10 °С. Средняя температура в баке в этом расчете составила 83,3 °С, то есть повысилась на 10,5 °С по сравнению с предыдущим расчетом. Эти результаты говорят о значительной роли теплообмена через боковую стенку трансформатора.

Рассмотрим эту же модель трансформатора, но со статической защитой, описанной выше (см. рис. 6.17). Материал статической защиты может иметь различную теплопроводность, поэтому расчет трансформатора с установленной защитой проводится для случаев теплопроводящего и теплоизолирующего материала (см. рис. 6.24).

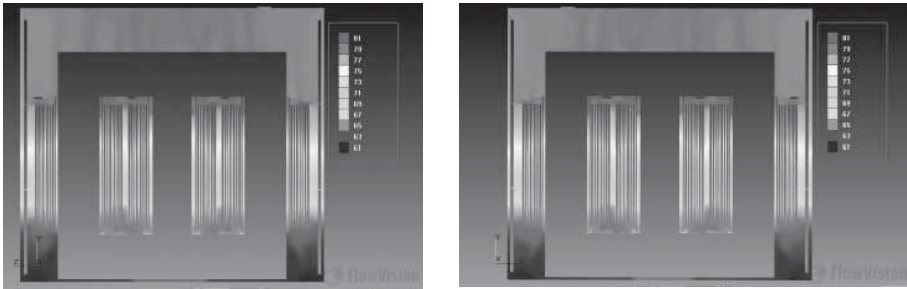


Рис. 6.23. Распределение температуры масла в баке силового трансформатора в рабочем режиме с конструктивными элементами для обеспечения взрывобезопасности из а) теплопроводящих и б) теплоизолирующего материалов

Полученные в расчетах значения средней температуры для изолирующего и проводящего материалов соответственно равны $72,9^{\circ}\text{C}$ и 73°C . То есть конвекция и теплообмен в трансформаторе практически не зависят от теплопроводящих свойств материала теплозащиты.

Отметим, что внесение конструктивных элементов для защиты трансформатора от взрыва увеличивает среднюю температуру лишь на $0,1^{\circ}\text{C}$, в то время как полное исключение боковых стенок бака из процессов теплообмена повышает среднюю температуру более чем на 10°C . Таким образом, можно сделать вывод, что установка статической защиты практически не уменьшает мощность теплоотдачи через боковую стенку бака трансформатора.

Рассмотрим, как поведут себя базовый трансформатор и модифицированный в режиме перегрузки на 10 % по мощности. Для этого увеличим тепловыделения в обмотках и магнитопроводе на 10 %.

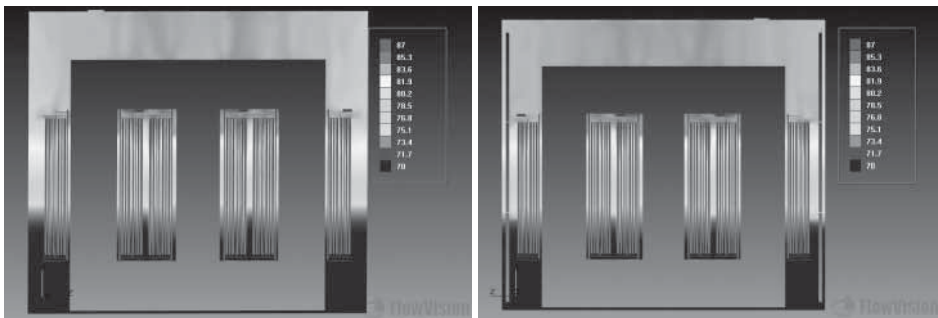


Рис. 6.24. Распределение температуры масла в баке силового трансформатора в режиме перегрузки на 10 %: а) базовая конструкция, б) модифицированная конструкция

Средние значения температуры масла в баке трансформатора (рис. 6.24.) для базовой и модифицированной конструкций составили 77,8 °С и 78 °С градусов. Таким образом, температура масла в обеих конструкциях увеличилась на 5,1 °С.

Сводные результаты расчета теплообмена в базовой и модифицированной конструкциях высоковольтного маслаполненного трансформатора IV габарита в различных режимах работы приведены в таблица 6.4.

Таблица 6.4. Средняя температура масла в баке относительно температуры окружающей среды в различных режимах и при различной конфигурации трансформатора

	Базовая конструкция	Модифицированная конструкция (теплоизолирующая подложка)	Модифицированная конструкция (теплопроводящая подложка)	Базовая конструкция с адиабатическими стенками
Режим короткого замыкания эквивалентным током	52,6 °С	-	-	63,5 °С
Рабочий режим	52,7 °С	52,9 °С	52,8 °С	63,3 °С
Режим перегрузки на 10 %	57,8 °С	58 °С	-	-

Из таблицы видим, что внесение статической защиты увеличивает среднюю температуру масла всего на 0,2 °С, тогда как в базовой конструкции с адиабатическими стенками температура масла повышена более чем на 10 °С. Таким образом, установка защиты, несмотря на то, что она теплоизолирует боковые стенки, не ухудшает теплообмен в трансформаторе. Этот парадоксальный результат объясняется тем, что теплозащита образует канал вдоль боковой стенки бака трансформатора, тем самым увеличивая скорость движения масла в нем и, соответственно, интенсифицируя теплообмен.

В итоге, можно заключить, что данная модификация силового трансформатора практически не нарушает процесс теплообмена боковой стенки бака трансформатора с внешней средой, и поэтому повышение средней температуры в баке для текущей конфигурации трансформатора незначительно.

CAD модель макета маслаполненного автотрансформатора

В данном разделе представлена CAD модель макета (упрощенной конструкции) маслаполненного высоковольтного автотрансформатора IV габарита без демпферной и динамической защиты. На рис 6.25. показан общий вид исходной модели автотрансформатора без установленных защит какого либо типа.



Рис. 6.25. Общий вид модели маслонаполненного автотрансформатора

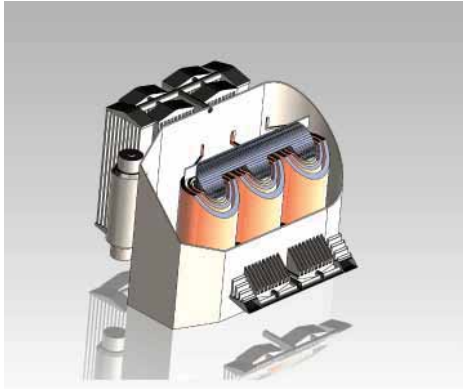


Рис. 6.26. Вид внутреннего устройства модели маслонаполненного автотрансформатора

На рис. 6.27. приведено внутреннее устройство исходного автотрансформатора без демпферной и динамической защит. Для наглядности проведено сечение модели плоскостью, расположенной под углом в 45 градусов к вертикали.

CAD модель макета маслонаполненного автотрансформатора с демпферной защитой

В данном разделе представлена CAD модель макета маслонаполненного высоковольтного автотрансформатора IV габарита с демпферной защитой.

Для расчета модели автотрансформатора с демпферной защитой была создана упрощенная CAD модель демпферной защиты. Общий вид модели демпферной защиты приведен на рис. 6.27.

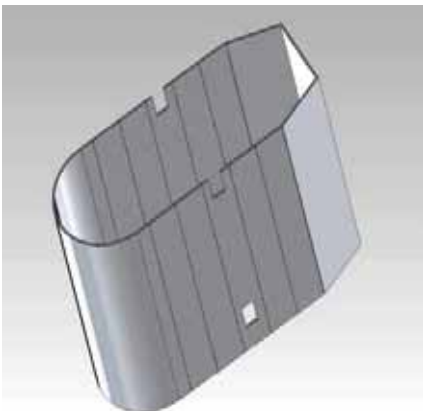


Рис. 6.27. Общий вид модели демпферной защиты для маслонаполненного автотрансформатора

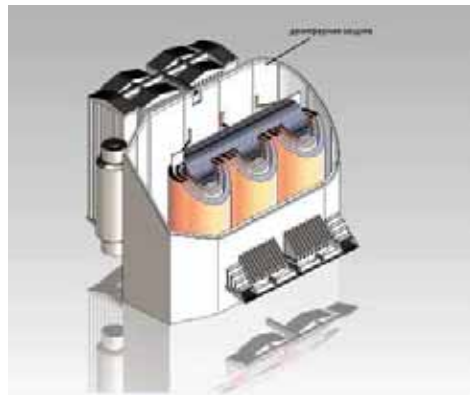


Рис. 6.28. Вид внутреннего устройства модели маслонаполненного автотрансформатора с установленной демпферной защитой

CAD модель автотрансформатора с установленной защитой приведена рис. 6.28. На рис. ниже также проведено отсечение части автотрансформатора плоскостью, расположенной под углом 45 градусов к вертикали.

Демпферная защита не препятствует свободной конвекции масла через внешний радиатор. Однако плотное прилегание демпферной защиты к стенкам автотрансформатора мешает естественному теплообмену с внешней средой через стенки автотрансформатора (остается только теплообмен через внешний радиатор)

CAD модель макета маслонаполненного автотрансформатора с динамической защитой

В данном разделе представлена CAD модель макета маслонаполненного высоковольтного автотрансформатора IV габарита с динамической защитой.

Для моделирования теплообмена в маслонаполненном автотрансформаторе с системой динамической защиты была создана CAD модель. Внешний вид созданной CAD модели приведен на рис. 6.29.



Рис. 6.29. Общий вид модели маслонаполненного автотрансформатора с динамической защитой



Рис. 6.30. Разрез системы распределения динамической защиты для маслонаполненного автотрансформатора

Через систему труб, находящихся в нижней части модели автотрансформатора, осуществляется ввод газа для динамической защиты. Отбор газа производится через трубу в верхней части приведенной модели. Более подробно система распределения динамической защиты по стенкам автотрансформатора представлена на рис. 6.30.

Как видно из приведенного рисунка, динамическая защита должна равномерно распределяться по стенкам автотрансформатора. Однако по результатам расчетов система распределения может измениться для обеспечения большей эффективности охлаждения автотрансформатора с данным типом защиты. Также возможные конструктивные сложности при создании такой системы динамической защиты могут привести к изменению ее конструкции.

На рис. 6.30. приведен вид внутреннего устройства автотрансформатора с системой динамической защиты. Для того чтобы показать внутреннее устройство автотрансформатора с системой динамической защиты, прове-

дено отсечение части автотрансформатора плоскостью, расположенной под углом 45 градусов к вертикали.

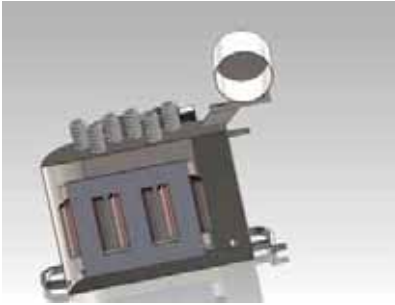


Рис. 6.31. Вид внутреннего устройства модели маслонаполненного автотрансформатора с установленной динамической защитой

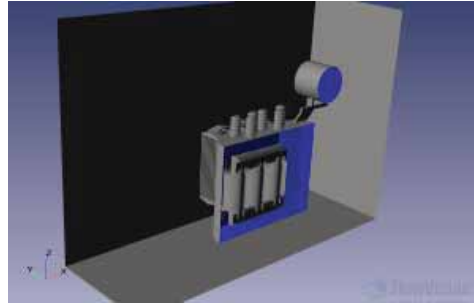


Рис. 6.32. Расчетная область

Расчетная область и граничные условия

Расчетная область состоит из пяти подобластей (см. рис. 6.32):

- а) «Масло»,
- б) «Воздух»,
- г) «Сталь» (магнитопровод),
- д) «Медь 1» (обмотка высокого напряжения),
- е) «Медь 2» (обмотка низкого напряжения).

На общих границах подобластей задается сопряженное граничное условие для уравнения энергии.

В подобластях «Сталь», «Медь 1», «Медь 2» задается объемное тепловыделение (свой объемный источник тепла).

Сечения расчетной области трансформатора с демпферной защитой различными плоскостями показаны на рис. 6.33.

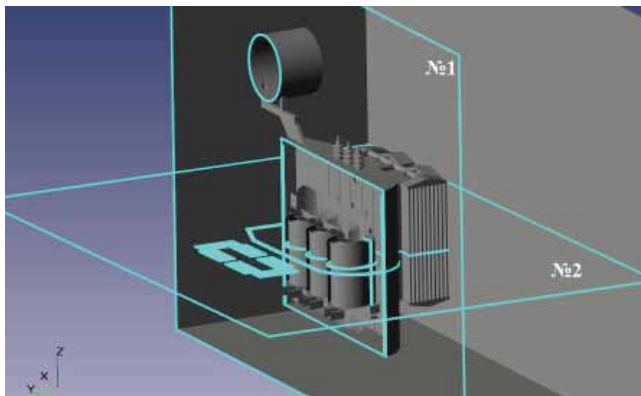


Рис. 6.33. Сечения расчетной области

При моделировании теплообмена с учетом демпферной защиты в расчет добавляется подобласть, прилегающая к стенкам бака и в которой задаются определенные свойства материала.

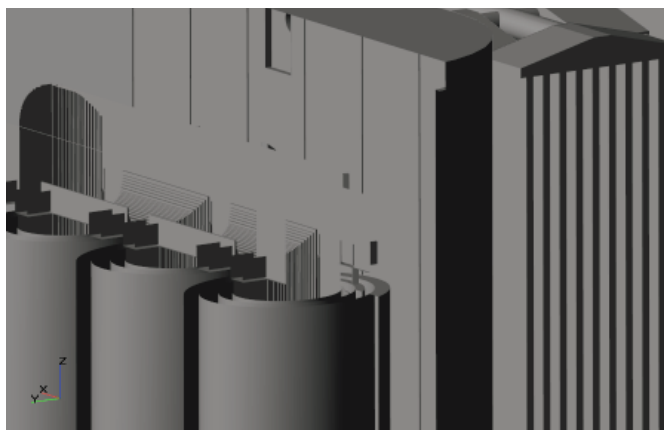


Рис. 6.34. Моделирование демпферной защиты

На рис. 6.35–6.36 показаны распределения температуры в различных сечениях.

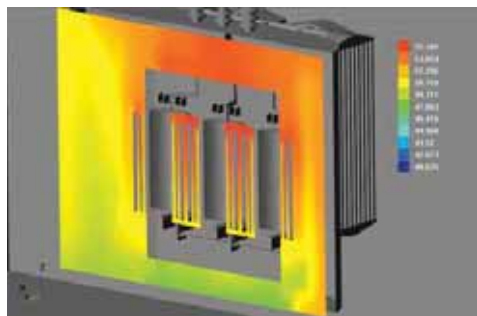


Рис. 6.35. Распределение температуры в сечении № 1 без демпферной защиты

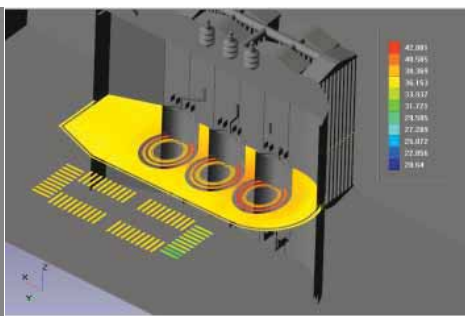


Рис. 6.37. Распределение температуры в сечении № 2 без демпферной защиты

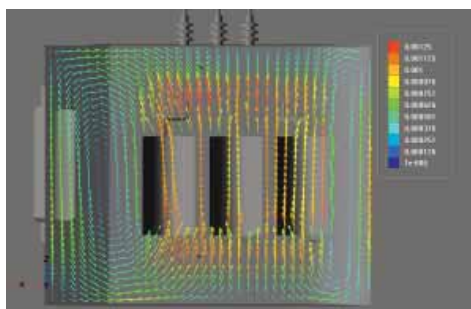


Рис. 6.37. Векторы скорости в сечении № 7

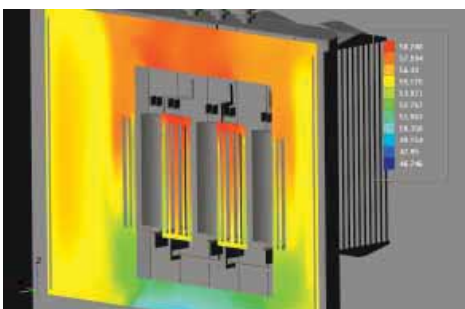


Рис. 6.38. Распределение температуры в сечении № 1 с демпферной защитой

Представленные результаты позволяют сделать следующие вывод, что введение демпферной защиты затрудняет теплообмен с окружающим воздухом через корпус автотрансформатора – максимальная температура увеличивается на 4°.

Заключение

1. Разработан программный модуль вычислительного пакета (ПК) **FlowVision** для расчета теплообмена в маслонаполненном высоковольтном автотрансформаторе, снабженном динамической защитой.

2. Созданы три CAD модели макетов серийного автотрансформатора IV габарита: без демпферной и динамической защит, с демпферной защитой, с динамической защитой.

3. Проведены тестовые расчеты конвекции и теплообмена в макете автотрансформатора IV габарита: без демпферной и динамической защит, с демпферной защитой.

4. Проведено численное исследование влияния модификации серийного трансформатора до взрывобезопасного на процессы теплообмена внутри него.

5. На основе серийного высоковольтного маслонаполненного трансформатора IV габарита построена базовая расчетная модель и проведено сравнение с заводскими тепловыми испытаниями. Результаты сравнения показали хорошее совпадение расчетных данных с экспериментальными.

6. Основная расчетная модель была изменена до взрывобезопасной конструкции при помощи статической защиты. Показано, что теплопроводность материала защиты незначительно влияет на теплообмен в трансформаторе, что объясняется гораздо большей долей конвективного теплопереноса по сравнению с теплопроводностью.

7. Результаты численного моделирования дают возможность исследования модификации серийного трансформатора до взрывобезопасного с использованием различных методов динамической и демпферной защиты.

Обозначения и сокращения

ВГД – вычислительная гидродинамика

ПК – программный комплекс

ПАК – программно-аппаратный комплекс

CAD модель – трехмерная геометрическая модель автотрансформатора, созданная в системе автоматического проектирования.

Макет автотрансформатора – упрощенная конструкция автотрансформатора.

C – удельная теплоемкость вещества при постоянном давлении

C_D^p – коэффициент сопротивления пузыря

d – средний диаметр пузырей

\hat{e} – тензор скоростей деформации

F – объемная сила

g – ускорение свободного падения

$H = h + V^2 / 2$ – полная энтальпия

h – термодинамическая энтальпия

\hat{I} – метрический (единичный) тензор

k – турбулентная энергия

n – внешняя нормаль к грани ячейки
 P – статическое давление
 Pr – молекулярное число Прандтля
 Pr_t – турбулентное число Прандтля
 Q_{int} – пользовательский источник тепла
 $\dot{q}_{c \rightarrow d}$ – удельный тепловой поток от несущей фазы к дисперсной
 $Re_d = |\mathbf{V}_c - \mathbf{V}_d| d / \nu_c$ – число Рейнольдса для пузыря
 T – температура
 t – время
 \mathbf{V} – скорость
 V_i – i -я декартова составляющая вектора скорости
 β – коэффициент объемного расширения
 λ – молекулярная теплопроводность
 $\mu_c = \rho \nu_c$ – молекулярная динамическая вязкость
 μ_{BL} – динамическая вязкость масла, обусловленная наличием пузырей
 μ_t – турбулентная динамическая вязкость
 $\mu_{eff, c} = \mu_c + \mu_{t, c} + \mu_{BL}$ – эффективная динамическая вязкость масла
 ν – молекулярная кинематическая вязкость
 ν_t – турбулентная кинематическая вязкость
 ρ – плотность
 ε – скорость диссипации турбулентной энергии
 $\hat{\tau}_{eff}$ – эффективный тензор вязких напряжений
 φ_c – объемная доля расчетной ячейки, заполненная несущей фазой (маслом)
 φ_d – объемная доля расчетной ячейки, заполненная дисперсной фазой (элегазом)

Индексы:

c – несущая фаза (масло)
d – дисперсная фаза (пузыри элегаза)

Литература

1. Нигматуллин Р.И. Динамика многофазных сред. Т. 7. Изд. Наука 1990, Т. 2. 1992.
2. Stanciu I. A new viscosity-temperature relationship for vegetable oil // Journal of Petroleum Technology and Alternative Fuels. 2012. Т. 3. № 2. С. 19–23.
3. Фабелинский И.Л. О макроскопической и молекулярной сдвиговой вязкости // Успехи физических наук. 1997. Т. 167. № 7. С. 721–733.
4. Ферри. Дж. Вязкоупругие свойства полимеров. Москва: ИЛ, 1963. С. 240.
5. Евдокимов И.Н., Елисеев Д.Ю. Отрицательная аномалия вязкости жидких нефтепродуктов после термообработки // Химия и технология топлив и масел. 2002. Т. 3. С. 26–29.
6. Kovaleva L.A., Zinnatullin R.R., Sliakliislamov R.R. On Studying the Influence of Treatment Temperature on Finite Viscosity of Oil Media // High Temperature. 2010. Т. 48. № 5. С. 759–760.

7. *Медведицков А.Н.* Вязкость жидкой серы и бинарной системы сера-йод в диапазоне температур 350...1000 К. Ph.D. thesis: ИВТАН СССР. 1984.
8. *Duffy B.R., Wilson S.K.* On the gravity-driven draining of a rivulet of fluid with temperature-dependent viscosity down a uniformly heated and cooled substrate // *Journal of Engineering Mathematics*. 2002. Т. 42. № 3/4. С. 359–372.
9. *Glialy A.Y., Seedeck M.A.* Chebyshev finite difference method for the effects of Chemical reaction, heat and mass transfer on laminar flow along a semi infinite horizontal plate with temperature dependent viscosity // *Chaos, solutions, Fractals*. 2004. Jan. Т. 19. № 7. С. 61–70.
10. *Aleksandrov A.A., Dzliuraeva E.V., Utenkov V.F.* Viscosity of Aqueous Solutions of Sodium Chloride // *High Temperature*. 2012. Т. 50. С. 354–358.
11. *Pearson J.R.A., Shah Y.T., Viera E.S.A.* Stability of nonisothermal flow in Channels – I. Temperature – dependent Newtonian fluid without heat generation // *Chemical Engineering Science*. 1973. Т. 28. С. 20792088.
12. *Цыдыпов Ш.В.* Вязкоупругие и теплофизические свойства жидкостей и стеклообразных систем в модели возбужденного состояния. Ph.D. thesis: ВГУ. 2007.
13. *Seeton Christopher J.* Viscosity-temperature correlation for liquids // *Tribology Letters*. 2007. April. Т. 22. № 7. С. 67–78.
14. *Aristov S.N. and Zelenina S.G.* Effect of heat transfer on the plane-channel poiseuille flow of a thermo-viscous fluid // *Fluid Dynamics*. 2000. Т. 35. № 2. С. 217–227.
15. *Polyakov A.F.* A Steady Viscous Thermogravitational Flow of Capillary Liquid and Heat Transfer in a Vertical Cavity under Asymmetric Heat Conditions // *High Temperature*. 2014. Т. 52. № 7. С. 72–77.
16. *Konstantinova N.Yu., Popel' P.S., Yagodin D.A.* The Kinematic Viscosity of Liquid Copper-Aluminum Alloys // *High Temperature*. 2009. Т. 47. С. 336–347.
17. *Ceotto D.* Thermal Diffusivity, Viscosity and Prandtl Number for Molten Iron and Low Carbon Steel // *High Temperature*. 2013. Т. 51. № 7. С. 131–134.
18. *Bel'tyukov A.L., Lad'yanov V.I., Shishmarin A.I.* Viscosity of Fe-Si Melts with Silicon Content up to 45 at % // *High*. 2014. Т. 52. № 2. С. 185–197.
19. *Персиков Э.С.* Вязкость магматических расплавов. Ph.D. thesis: Институт экспериментальной минералогии АН СССР, Черноголовка. 1984.
20. *Campbell I.H., Turner J.S.* The Influence of Viscosity on Fountains in Magma Chambers // *Journal of Petrology*. 1987. Т. 27. № 7. С. 1–30.
21. *Ultrasonic Doppler Velocity Profiler for Fluid Flow* / под ред. Yasushi Takeda. Springer Japan, 2012.
22. *Вардыштова К.М., Бернитадт Я.А, Богданов Ш.К.* Топлива, смазочные материалы, технические жидкости. Ассортимент и применение: Справ, изд. / под ред. В. М. Школьников. Москва: Химия, 1989.
23. *Урманчиев С.Ф.* Гидродинамические эффекты в аномально термовязких и пористых средах. Ph.D. thesis: Институт механики Уфимского научно-го центра РАН. 2004.

24. Киреев В.И., Урманчеев С.Ф. Течение жидкостей с температурной аномалией вязкости // Труды Института механики УНЦ РАН. 2003. Т. 3. С. 232–245.

25. Fink Jonathan H., Park Seung O., Greeley Ronald. Cooling and deformation of sulfur flows // Icarus. 1983. Oct. Т. 56. № 7. С. 38–50.

26. Ильясов А.М., Моисеев К. В., Урманчеев С. Ф. Численное моделирование термоконвекции жидкости с квадратичной зависимостью вязкости от температуры // Сибирский журнал индустриальной математики. 2005. Т. 8, № 4. С. 51–59.

27. Урманчеев С. Ф. Течение термовязких сред // Вестник Нижегородского университета им. И.И. Лобачевского / под ред. Р.Г. Стронгин; X Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики. Т. 3. 2017. С. 1197–1199.

28. Особенности конвективных течений аномально термовязкой жидкости / В.С. Кулешов, К.В. Моисеев, С.Ф. Хизбуллина [и др.] // Математическое моделирование. 2017. Т. 29. № 5. С. 16–27.

29. Низамова А.Д., Киреев В.И., Урманчеев С.Ф. Об устойчивости ламинарного режима течения термовязких жидкостей // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2015. Т. 1. № 2. С. 104–117.

30. Низамова А.Д., Киреев В.И., Урманчеев С.Ф. Некоторые точные решения стационарной системы уравнений для стратифицированного течения двух термовязких жидкостей // Вестник УГАТУ. 2017. Т. 20. № 2. С. 91–95.

31. Yih Chia-Shun. Instability due to viscosity stratification // Journal of Fluid Mechanics. 1967. Т. 27, № 02. С. 337.

32. Potter M.C., Graber E. Stability of Plane Poiseuille Flow with Heat Transfer // Physics of Fluids. 1972. Т. 15. № 3. С. 387.

33. Schafer P., Herwig H. Stability of plane Poiseuille flow with temperature dependent viscosity // International Journal of Heat and Mass Transfer. 1993. jan. Т. 36. № 9. С. 2441–2448.

34. Wall D.P., Wilson S.K. The linear stability of channel flow of fluid with temperature-dependent viscosity // Journal of Fluid Mechanics. 1997. Sep. Т. 323. № 7. С. 107.

35. Danaila L., Antonia R.A., Burattini P. Progress in studying small-scale turbulence using 'exact' two-point equations // New Journal of Physics. 2004. Т. 6. № 7. С. 128. URL: <http://stacks.iop.org/1367-2630/6/i=7/a=128>.

36. Yaglom-like equation in axisymmetric anisotropic turbulence / L. Danaila, J.F. Krawczynski, F. Tliiesset [и др.] // Pliysica D: Nonlinear Phenomena. 2012. Т. 3. С. 247.

37. Фрик П.Г. Турбулентность: модели и подходы. Курс лекций. Часть II. ПГТУ, Пермь, 1998. С. 137.

38. Variable Viscosity Jets: Entrainment and Mixing Process / L. Voivenel, E. Varea, L. Danaila [и др.] // Whither Turbulence and Big Data in the 21st. Century? / под ред. Andrew Pollard, Luciano Castillo, Luminita Danaila [и др.]. Cham: Springer International Publishing, 2017. С. 147–162.

39. *Grea Benoit-Josepli, Griffond Jerome, Burlot Alan*. The effects of variable viscosity on the decay of homogeneous isotropic turbulence // *Physics of Fluids*. 2014. mar. T. 26.V 3. C. 035104.
40. *Taylor G. I.* Statistical Theory of Turbulence // *Proceedings of the Royal Society of London. Series A – Mathematical and Physical Sciences*. 1935. sep. T. 151. V 873. C. 421–444.
41. *Cliliabra Sudliaker, Shipman Thomas N., Prasad Ajay K.* The entrainment behavior of a turbulent axisymmetric jet in a viscous host fluid // *Experiments in Fluids*. 2004. Nov. T. 38.V 7. C. 70–79.
42. *Taguelmimt Nouredine, Danaila Luminita, Hadjadj Abdellali*. Effects of Viscosity Variations in Temporal Mixing Layer // *Flow, Turbulence and Combustion*. 2017. T. 96.V 7. C. 163–187. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s10494-015-9649-7>.
43. *Kulikov Y.M., Son E.E.* Fluid flow with abrupt viscosity-temperature dependence // *High Temperature*. 2014. Vol. 52. No. 5. P. 723–729.
44. *Kulikov Y.M., Son E.E.* Stability of thermoviscous fluid flow under high temperature gradients // *High Temperature*. 2017. Vol. 55. No. 5. P. 131–138.
45. *Головизнин В.М., Самарский А.А.* Некоторые свойства разностной схемы «КАБАРЕ» // *Математическое моделирование*. 1998. Т. 10, № 7. С. 101–167.
46. *Головизнин В.М., Зайцев М.А., Карабасов С.А., Короткин И.Н.* Новые алгоритмы вычислительной гидродинамики для многопроцессорных вычислительных комплексов // *Москва: Издательство Московского университета*. 2013. 472 С.
47. *Kulikov Y.M., Son E.E.* The CABARET method for a weakly compressible fluid flows in one- and two-dimensional implementations // *Journal of Physics: Conference Series*. 2017. Vol. 774. P. 012094.
48. Черный Г.Г. Газовая динамика: Учебник для университетов и вузов // *Москва: Наука*. Гл. ред. физ.-мат. лит. 1988. 424 с.
49. *Аксёнов А.А., Жлуктов С.В., Кудимов Н.Ф., Сон Э.Е., Таран М.Д., Третьякова О.Н., Шишаева А.С.* О моделировании сложного теплообмена в силовых трансформаторах большой мощности // *Журнал Известия РАН. Энергетика*, 2013. № 2. С. 131–147.
50. Overcoming of Barrier between CAD and CFD by Modified Finite Volume Method [Текст] / *Aksenov, A. A., Dyadkin, A.A., Pokhilko, V.I.* // *Proc. of «1998 ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference»*, San Diego, ASME PVP – 1998, Vol. 377–7.
51. Electrohydrodynamic Instability of Fluid Jet in Microgravity / *Aksenov, A.A., Gudzovsky, A.V., Serebrov, A.A.* // *Proc. of 5th Int. Symposium on Computational Fluid Dynamics (ISCFD)*, Aug. 31–Sept. 3, 1993. Sendai, Japan, Japan Society of Computational Fluid Dynamics, 1993. Vol. 1, pp 19–24.
52. Силовые трансформаторы. Спр. книга / *С.Д. Лизунова, А.К. Лоханина*. М.: Энергоиздат, 2005. С. 5–210.
53. ГОСТ 11677–85. ТРАНСФОРМАТОРЫ СИЛОВЫЕ: Общие технические условия. Госстандарт России Общероссийский классификатор продукции ОК 005–93, Москва, ИПК Издательство стандартов, 2000.

54. Сушко Г.Б., Харченко С.А. Экспериментальное исследование на СКИФ МГУ «Чебышев» комбинированной MPI + threads реализации алгоритма решения систем линейных уравнений, возникающих во FlowVision при моделировании задач вычислительной гидродинамики // Тр. междунар. научной конф. Параллельные вычислительные технологии (ПаВТ'2009). Нижний Новгород, 30 марта–3 апреля 2009 г. Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 2009. С. 316–324.

55. Харченко С.А. Влияние распараллеливания вычислений с поверхностными межпроцессорными границами на масштабируемость параллельного итерационного алгоритма решения систем линейных уравнений на примере уравнений вычислительной гидродинамики // Тр. Междунар. научной конф. «Параллельные вычислительные технологии». СПб. 28 января–1 февраля 2008 г. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2008. С. 494–499.

56. Киш Л. Нагрев и охлаждение трансформаторов. Москва: Энергия, 1980. 208 с.; Трансформаторы. Вып. 37. С. 50–130.

57. Воеводин И.Д., Михайловский Ю.А., Черноготский В.М. и др. Методы расчета превышений температуры обмоток силовых трансформаторов // Трансформаторы: Перенапряж. и координация изоляции. Пер. докл. Междунар. конф. по больш. электр. системам СИГРЭ 84. Москва: 1987. С. 190–198.

ГЛАВА 7. МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗРЫВОВ И КИНЕТИКИ НАПРЯЖЕННО- ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ВМЭО

Представлен обзор по моделированию взрывов и кинетики напряженно-деформированного состояния ВМЭО. Описаны три пакета и их применение к разрушению высоковольтных маслонаполненных трансформаторов при возникновении короткого замыкания: пакет Flow Vision, пакет GDT (Gas Dynamic Tool) и сопряжение пакетов ANSYS и LS DYNA. Описаны физико-математические модели, лежащие в основе пакетов, вычислительные схемы и интерфейсы пакетов. Проведено сравнение с экспериментальными результатами в тех случаях, когда они были доступны.

7.1. ОБЗОР РАБОТ ПО ЧИСЛЕННОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ ВЗРЫВОВ ВМЭО

Сравнивая натурные измерения во время аварий с трансформаторами, можно сделать вывод о том, что вероятность разрушения корпуса трансформатора тесно связана с энергией образующейся электрической дуги при пробое. Нарастающее давление в корпусе трансформатора, приводящее в конечном итоге к разрушению, вызывается большим количеством энергии, высвобождающейся в виде теплоты при образовании электрической дуги. Наиболее вероятный сценарий разрушения – электрическая дуга в масле, начинающаяся в токовводе или в высоковольтной части трансформатора и заканчивающаяся на корпусе.

В работе [1] теоретически и численно изучается работа клапана давления. Оба подхода подтверждают, что снижение давления посредством единственного клапана оказывает незначительное влияние на предотвращение разрушения, что должны быть разработаны значительно более сложные и дорогостоящие системы клапанов.

Разрушение корпуса – очень сложное явление для исследования, т.к. испытание дуги чрезвычайно дорого, и, кроме того, пробой случаен по своей природе. В 1985 г. была начата программа с целью разработать фундаментальное понимание механизма разрушения, эффективность устройств снижения давления и осуществимость мер по препятствию разрушения. В результате был разработан сложный динамический метод вычисления, который был успешно опробован на трансформаторах различных размеров и конструкций. Главные выводы этого исследования были изданы в 1994 [2] и привели в 2008 г. к реализации новой спецификации для снижения разрушающих последствий пробоя.

Из результатов исследований можно сделать вывод, что приблизительно 60 % разрушений были последствием пробоя в токовводе или высоковольтной части трансформатора, и примерно в половине случаев закончилась

пожаром. Однако неполадки в обмотках хотя и составляют четверть всех случаев разрушения, не являются причиной пожара.

Помимо этого, были сделаны следующие выводы:

1. вероятность разрушения трансформатора тесно связана с энергией образующейся электрической дуги, и увеличивается экспоненциально с увеличением напряжения в первичной обмотке трансформатора;

2. наиболее вероятный сценарий разрушения – дуга в токовводе или в высоковольтной части трансформатора;

3. традиционные конструкции трансформаторов плохо выдерживают высокое давление при пробое;

4. в редких случаях энергия дуги может достигать столь больших величин, что даже улучшенные конструкции трансформаторов могут быть разрушены;

5. снижение давления через единственный клапан имеет незначительный эффект в предотвращении разрушения (рис. 7.1). Для увеличения вероятности целостности конструкции необходимы или многочисленные клапана, установленные по периметру трансформатора, или единственный, но очень большой клапан в виде канала.

В работе [3] было выполнено численное моделирование увеличения давления на стенке трансформатора в результате неполадки, а также сопутствующие при этом эффекты, которые были проанализированы с помощью метода FSI (Fluid Structure Interaction). Также были изучены принципы взрыва трансформатора и распространения волн давления. Повышение давления, воздействующего на стенку трансформатора, было проанализировано с рассмотрением ударных волн. Кроме того, была предложена эффективная технология предотвращения разрушения трансформатора в виде системы разгрузки давления.



а) пробой на другой стороне от клапана б) пробой рядом с клапаном

Рис. 7.1. Последствия пробоя на 75 мс после начала. Показано: желтым – трансформаторное масло, красным – газ, образовавшийся после испарения масла, синим – стенки трансформатора

Исследования были осуществлены численным пакетом, моделирующим тепло- и массообмен. В алгоритме было принято допущение, что жидкость – сжимаемая, а течение двухфазной жидкости – неустановившееся. Был реализован метод жидкости в ячейке (Volume Of Fluid, VOF) для моделирования двухфазной области потока, которая включает фазовый переход масла из жидкого состояния в газообразное.

На рис. 7.2 представлены результаты моделирования в виде распределения давления с течением времени при пробое. Избыточное давление сначала образует симметричную волну сжатия, которая распространяется и взаимодействует со стенками трансформатора. Отраженные от стен волны взаимодействуют друг с другом и создают локальные области повышенного давления. Это приводит к формированию сильно сжатого сферического газового пузыря, который выталкивает окружающее масло и является источником ударных волн.

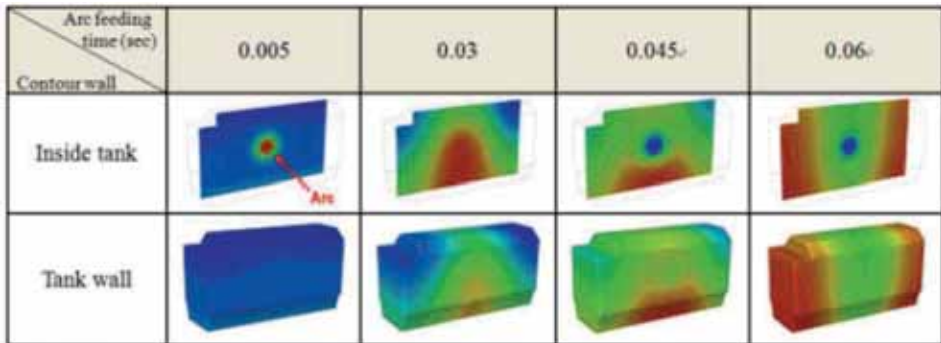


Рис. 7.2. Распределение давления от времени внутри трансформатора и на его стенке

С помощью динамического структурного анализа на основе распределения давления на стенках трансформатора, были определены местные напряжения и распределения смещений в корпусе. В частности, целью исследования было определение места и времени проявления наибольших механических напряжений внутри трансформатора. Трехмерная конечно-разностная модель трансформатора была построена в виде прямоугольного параллелепипеда с равномерно расположенными ребрами жесткости снаружи на вертикальных стенках. Не учитывались некоторые усложнения конструкции, такие, как сердечник, обмотки и изоляторы. В качестве материала корпуса была взята сталь с большим пределом текучести для обеспечения достаточной прочности конструкции и увеличения упругости стенок.

В следующей работе [4] представлена физико-математическая модель течения продуктов распада (испарения) трансформаторного масла вследствие электрического пробоя и подрыва взрывчатых веществ. Представлены численные результаты моделирования для характерных условий функционирования высоковольтного маслонаполненного электрооборудования.

Компьютерные результаты моделирования качественно совпадают с экспериментальными данными.

В этой работе также представлено численное моделирование скачка уплотнения (ударной волны), развивающегося внутри заполненного водой цилиндра в случае локального энерговыделения, соответствующего электрическому пробоя. Предложенные компьютерные модели и коды позволяют моделировать движение сжимаемой жидкости и тепловыделение вследствие электрического пробоя. Эти алгоритмы основаны на полных уравнениях Навье-Стокса в двумерной геометрии с аксиальной симметрией и использованием широкодиапазонного уравнения состояния воды, предложенного Кузнецовым [5].

Компьютерная модель включает следующие упрощения и допущения: вязкость, удельная теплопроводность и перемещение электрической дуги при действии собственного магнитного поля не учитывались. Электрическая дуга генерировалась и располагалась на оси цилиндра внутри области с начальным диаметром 6 мм. Были рассмотрены только относительно короткие (меньше 2 мс) энергетические импульсы. Такая постановка задачи позволила произвести исследования процессов на таких малых временных интервалах, при которых они еще не проявляли трехмерный характер.

Численные расчеты дали достаточно хорошее согласование с проведенными экспериментами.

Для определения состояния вещества внутри газообразного пузыря были выполнены термодинамические и кинетические расчеты. Для того, чтобы достичь достоверности численных гидродинамических моделирований, необходимо было использование широкодиапазонного уравнения состояния. Это подразумевает знание характеристик жидкости в широком диапазоне термодинамических параметров. Следует отметить, что во время энерговыделения в масле существуют две фазы: достаточно холодное масло, в которой распространяются волны сжатия и разрежения, и горячие газообразные продукты разложения. В современной литературе можно найти большое количество экспериментальных данных для воды и практически никаких данных для трансформаторного масла.

Работа [7] представляет последние достижения компании Hydro-Québec в развитии и применении усовершенствованных тепловых моделей, как части основного проекта, прежде всего направленного на оптимизацию использования существующих трансформаторов в сети Hydro-Québec. Для подтверждения предложенных концепций практическим примером, эта работа представляет как результаты моделирования, так и прямые измерения температуры обмотки трансформатора, используя волоконно-оптические зонды на трансформаторе передачи (66 МВт, 225/26.4 кВ, ONAN/ONAF), который был восстановлен после повреждения, вызванного перегревом низковольтной обмотки. Моделирования и измерения были выполнены на низковольтных обмотках дискового типа с зигзагообразным охлаждением, которое очень распространено в трансформаторном производстве.

Было обнаружено, что тепловая модель сети (Thermal Network Model, TNM) и расчеты, основанные на конечно-разностных методах (Computational Fluid Dynamics, CFD) хорошо согласуются при определении температуры в местах перегрева, и где потери равномерно распределены. В случае неоднородного распределения потерь, есть большее несоответствие между TNM и прогнозами зон перегрева CFD. Расчетные температуры были подтверждены с помощью прямых измерений температуры обмотки, выполненных во время действия трансформатора.

Детализированная тепловая модель сети (TNM) обмотки используется для расчета движения масла в каналах, а также для расчета температуры проводников в установившемся режиме.

В численных расчетах CFD, вместо использования эмпирических или аналитических формул, решаются дифференциальные уравнения для жидкости (уравнения Навье-Стокса) и твердого тела (уравнение теплопроводности). Для режимов потоков, рассматриваемых в этой работе, не требуется никакая модель турбулентности, поскольку поток – ламинарный, что обусловлено очень низкими скоростями движения масла (ниже 10 см/с) в охлаждающих каналах обмотки.

Расхождение результатов, полученных двумя подходами, вызвано главным образом тем, что приближение TNM решает задачу движения масла с помощью аналитических формул, которые используют средние значения скорости и температуры. Тем не менее, два численных метода дают очень схожие значения для температуры в области перегрева.

Обмотки трансформатора по типу конструкции могут быть классифицированы на два класса (типа) прослойки и диска. Еще совсем недавно, обмотки дискового типа с зигзагообразным расположением охладителя широко применялись в больших силовых трансформаторах, однако, в этом случае очень трудно определить температуру места перегрева обмотки из-за сложного характера движения масла. Работа [8] описывает поток жидкости и рабочие характеристики теплообмена обмотки с зигзагообразным охлаждающим каналом. Были проведены гидро- и термодинамические исследования, с целью определить оптимальную конструкцию охлаждения в виде зигзагообразной обмотки в трансформаторах различного типа. Основными характеристиками системы охлаждения трансформатора являются длина и ширина проводника, горизонтальный и вертикальный размер канала, число перегородок, расхода масла. Полученные в результате исследования корреляции теплообмена и перепада давления в зигзагообразной обмотке представлены в безразмерных единицах. Чтобы подтвердить предположенные корреляции, был проведен ряд экспериментов для зигзагообразной обмотки с такими же переменными, как и для численного расчета. Из сравнения между численными и экспериментальными результатами был сделан вывод о том, что полученные корреляции могут точно предсказать рост температуры обмотки и масла, а также перепад давления.

Смена режимов работы или пробой в изолированном распределительном устройстве газа (РУГ) может генерировать очень быстрые переходные процессы (БПП), которые распространяются в РУГ только с небольшим ослаблением. Эти импульсы могут быть вредными для оборудования, связанного с РУГ, например, для трансформаторов.

В работе [9] сообщается об изучении высокочастотных свойств токоввода, разработанного для РУГ, размещающегося на маслонаполненной установке. Были сделаны большие усилия как при моделировании, так и при проведении измерений, чтобы выяснить эффекты, проявляющиеся при переходных процессах. Один из самых важных выводов заключается в том, что напряжение электрического поля в токовводе определяется частотами во внешней цепи, которые могут взаимодействовать с внутренними частотами токоввода. Особенно опасная ситуация может возникнуть при резонансе, т.е. тогда, когда частоты внешней цепи близки к внутренним частотам. Работа [9] посвящена исследованию высокочастотных свойств токоввода на двух различных испытательных установках. Детализированная модель токоввода и испытательной цепи была разработана с использованием программного обеспечения Spice для моделирования электрических цепей. Расчетные характеристики самого токоввода подтверждены тщательными измерениями во временном и в частотном областях (диапазонах). Полная модель тестовой установки БПП, как и большая модель токоввода были построены в расчетном пакете Spice. Главная цель этого исследования состояла в том, чтобы определить, как электрическое поле в токовводе зависит от конструктивных параметров самого токоввода и характеристик внешней цепи.

Измерения, произведенные при низко- и высоковольтных испытаниях БПП сравнивались с данными численного моделирования. Переходные характеристики и развертка по частоте совпали с результатами моделирования лишь для низковольтных испытаний.

Самое важное следствие этих исследований является понимание того, как происходит внутреннее перенапряжение в токовводе, и что его создает сочетание внешней цепи и внутренних резонансных частот.

7.2. ПРОГРАММНЫЙ МОДУЛЬ ГДТ (GA DYNAMIC TOOL) ДЛЯ ВЗРЫВНЫХ ПРОЦЕССОВ В МАСЛОНАПОЛНЕННЫХ ТРАНСФОРМАТОРАХ

В настоящем разделе приведено описание программного комплекса GDT (Gas Dynamic Tool) для моделирования распространения ударных волн в макетах высоковольтного маслонаполненного электрооборудования. Комплекс создан на базе существующего отечественного пакета численного моделирования газодинамических процессов GasDynamicsTool (рис. 7.3).

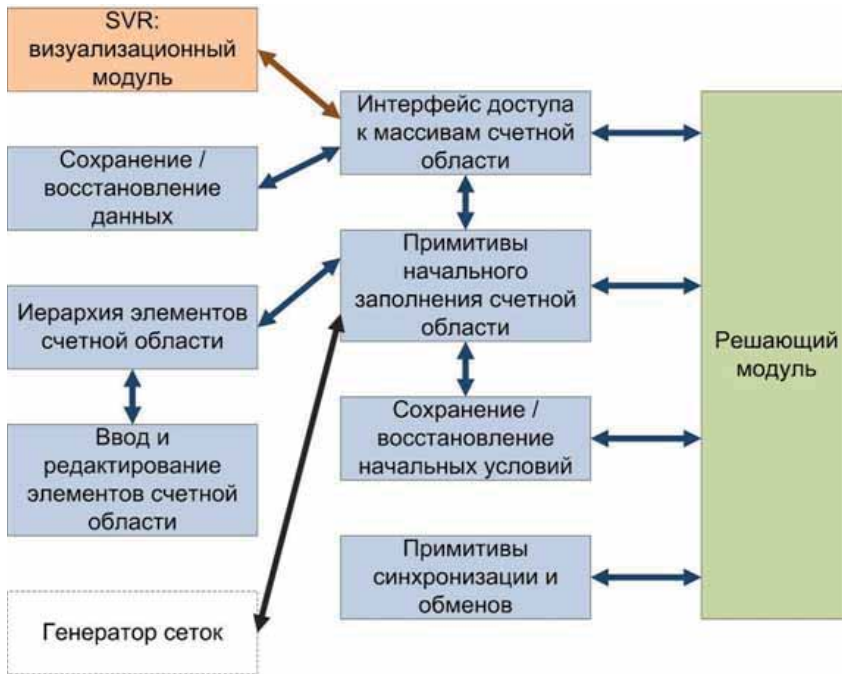


Рис. 7.3. Структура программного комплекса

Программный комплекс производит генерацию сеток для автотрансформаторов, соответствующих стандартам высоковольтного электротехнического оборудования. Программный комплекс способен рассчитывать образование и распространение ударных волн при давлениях до 50 МПа и температурах, достигающих температуры кипения трансформаторного масла.

7.2.1. Физико-математические модели

Используемые обозначения:

p – давление в среде, Па

p_0 – нормальное давление, (10^5 Па)

T – температура, К

T_0 – нормальная температура, К (300 К)

ρ – плотность среды, кг/м^3

ρ_0 – плотность при нормальных условиях, кг/м^3 (860.0–895.0 кг/м^3)

$\bar{\rho} = \rho/\rho_0$

$\rho_{cr} = 230$ – плотность в критической точке, кг/м^3

E – удельная внутренняя энергия, Дж/кг

e – удельная полная энергия, Дж/кг

$p^* = 98068.0$ – нормировочный множитель в уравнениях (8.1), (8.2)

Подгоночные параметры в уравнениях (8.1), (8.2):

$T = 300$ К; $k = 9.0$, $\sigma = 375.0$

Законы сохранения массы, количества движения и энергии

$$\begin{aligned}\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) &= 0, \\ \rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} \right) &= -\nabla p, \\ \frac{\partial}{\partial t} (\rho e) + \nabla \cdot [\mathbf{u} (\rho e + p)] &= 0, \\ e &= E + u^2 / 2.\end{aligned}$$

Уравнение состояния

Уравнение состояния используется для расчета изменения давления и внутренней энергии трансформаторного масла под действием энерговыделения в области высоковольтного пробоя. Уравнение применимо до давления 2×10^4 атм.

Уравнение для расчета давления по температуре и плотности трансформаторного масла в широком диапазоне термодинамических параметров:

при $\rho_0 \leq \rho$

$$p/p^* = p_H \left(1 - 0.012 \bar{\rho}^2 f(\bar{\rho}) \right) + 1.5 \bar{\rho} f(\bar{\rho}) (T - T_0) \left(\kappa - (\kappa - 1) \exp \left(-\frac{T - T^*}{\sigma} \right) \right), \quad (7.1)$$

при $\rho < \rho_0$

$$p/p^* = \xi^4 - 470 \bar{\rho} f(\bar{\rho}) \xi + 1.5 \bar{\rho} f(\bar{\rho}) (T - T_0) \left(\kappa - (\kappa - 1) \exp \left(-\frac{T - T^*}{\sigma} \right) \right). \quad (7.2)$$

В уравнениях (7.1), (7.2):

$$f(\bar{\rho}) = \frac{1 + 3.5 \bar{\rho} - 2 \bar{\rho}^2 + 7.27 \bar{\rho}^6}{1 + 1.09 \bar{\rho}^6} \quad \xi = 6.6 (1 - \bar{\rho})^{0.57} \bar{\rho}^{0.25} \quad \text{при } 0 < \bar{\rho} < 0.8,$$

$$\xi = 10 (1 - \bar{\rho}) + 66 (1 - \bar{\rho})^2 - 270 (1 - \bar{\rho})^3 \quad \text{при } 0.8 < \bar{\rho} < 8.0.$$

Параметр p_H в уравнении (7.1):

$$p_H = \frac{3050 (\bar{\rho}^{7.3} - 1)}{1 + 0.7 (\bar{\rho} - 1)^4} \quad 0 < p \leq 2 \times 10^4 \text{ атм.}$$

Уравнение для расчета внутренней энергии:

$$\tilde{\varepsilon} = 20.04 \cdot T + 0.63 \cdot 10^5 \frac{\left(1 - \frac{1}{\bar{\rho}}\right) \left(0.71 - \frac{1}{\bar{\rho}}\right)}{\left(\frac{1}{\bar{\rho}}\right)^{4/3}} \left(1 - 2\bar{\rho} \exp(-\bar{\rho}^2)\right) \text{ при } \rho_0 \leq \rho, \quad (7.3)$$

$$\tilde{\varepsilon} = 20.04 \cdot T \quad \text{при } \rho_{cr} < \rho < \rho_0, \quad (7.4)$$

где $\tilde{\varepsilon} = \varepsilon \frac{\rho_1}{\rho}$; $p_1 = 10^5$ Па; $\rho_1 = 1000$ кг/м³.

В продуктах разложения трансформаторного масла

$$\varepsilon = \begin{cases} AX + BX^2, & T < 1000K \\ CX + D, & 1000 \leq T \leq 2000K. \\ EX + F, & 2000 \leq T, K \end{cases} \quad \text{при } \rho < \rho_{cr} \quad (7.5)$$

Здесь $X = (T - 298.15^0)$. Входящие в уравнение (8.5) константы равны: $A = 1678.56$, $B = 8.4756$, $C = 4062.7$, $D = -946438.8$, $E = 23584.0$, $F = -34168762.28$.

7.2.2. Численная реализация

Используемый численный метод

Решение приведенных уравнений осуществляется методом крупных частиц. Метод крупных частиц является универсальным методом интегрирования нелинейных систем уравнений газовой динамики, относится к методам сквозного счета и используется для исследования аэрогазодинамических течений, дифракционных задач, трансзвуковых потоков, явлений взаимодействия излучения с веществом и др. Он логически прост и легко программируется.

Метод крупных частиц является развитием метода «частиц в ячейках», предложенного Ф.Харлоу в 1955 году. Основная идея метода крупных частиц, предполагает расщепление физического процесса на подпроцессы. Вначале изучается состояние подсистем, находящихся в ячейках, в предположении их замороженности или неподвижности, затем рассматривается смещение всех частиц пропорционально их скорости и шагу по времени без изменения внутреннего состояния подсистем с последующим пересчетом расчетной сетки в исходное состояние. В отличие от метода «частиц в ячейках», метод крупных частиц рассматривает не дискретную модель частиц, а непрерывные потоки массы через границы эйлеровых ячеек. Эти потоки определяются из закона сохранения массы, записанного в разностной форме для каждой ячейки (крупной частицы), совпадающей в данный момент с эйлеровой ячейкой.

Метод крупных частиц предусматривает расчет нестационарного течения среды. Стационарное решение (если такое существует) находится посредством установления.

В процессе реализации схемы крупных частиц каждый временной шаг интегрирования системы уравнений разбивается на три этапа. Рассмотрим все этапы расчетного цикла в отдельности.

В качестве исходной модели возьмем модель движения идеального сжимаемого газа, записанную в интегральном виде

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho dV = - \oint_S \rho \mathbf{u} \cdot \mathbf{n} dS; \quad (7.6)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_w \rho \mathbf{u} dV = - \oint_S [(\rho \mathbf{u}) \mathbf{u} \cdot \mathbf{n} + p \cdot \mathbf{n}] dS; \quad (7.7)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_w \rho E dV = - \oint_S [\rho E (\mathbf{u} \cdot \mathbf{n}) + p (\mathbf{u} \cdot \mathbf{n})] dS. \quad (7.8)$$

Замыкающими соотношениями для этой системы будут уравнения

$$e = E - u^2 / 2 \text{ и } p = \rho e (\gamma - 1). \quad (7.9)$$

В начале счета область интегрирования покрывается фиксированной в пространстве (эйлеровой) расчетной сеткой с прямоугольными ячейками со сторонами в плоскости декартовой системы координат Δx и Δy или Δz и Δr в цилиндрической системе координат. Значения целых чисел i (вдоль x , z) и j (вдоль y , r) обозначают центр ячейки.

На первом этапе расчета (эйлеровом) изменяются лишь величины, относящиеся к ячейке в целом, а жидкость предполагается моментально заторможенной. Поэтому конвективные члены вида $\oint_S \rho \varphi (\mathbf{u} \cdot \mathbf{n}) dS$, где $\varphi = (1, \mathbf{u}, E)$,

соответствующие эффектам перемещения, в исходной системе уравнений отбрасываются. Из уравнения неразрывности в этом случае следует, что поле плотности заморожено, $\rho = const$ и оставшиеся уравнения примут вид

$$\rho \frac{\partial}{\partial t} \int_w \mathbf{u} dV = - \oint_S p \cdot \mathbf{n} dS; \quad (7.10)$$

$$\rho \frac{\partial}{\partial t} \int_w E dV = - \oint_S p (\mathbf{u} \cdot \mathbf{n}) dS. \quad (7.11)$$

Полученные уравнения аппроксимируются конечно-разностными соотношениями. Заметим, что значения элементарного объема и элементарной площади зависят от принятой системы координат и для двумерного варианта определяются соотношениями, приведенными в таблице:

Таблица 7.1

Параметр	Декартова система координат	Цилиндрическая система координат
$\Delta S_{j-1/2}$	Δx	$2\pi\Delta r (j-1) \Delta z$
$\Delta S_{j+1/2}$	Δx	$2\pi\Delta r j \Delta z$
$\Delta S_{i+1/2}$ $\Delta S_{i-1/2}$	Δy	$2\pi\Delta r (j-1/2)\Delta r$
ΔV_{ij}	$\Delta y \Delta x$	$2\pi\Delta r (j-1/2) \Delta z \Delta r$

В качестве примера запишем подобную аппроксимацию для цилиндрической системы координат:

$$\rho_{i,j}^n \left(\frac{\partial u}{\partial t} \right)_{i,j}^n \Delta r (j-1/2) \Delta z \Delta r = -(p_{i+1/2,j}^n - p_{i-1/2,j}^n) \Delta r (j-1/2) \Delta r ; \quad (7.12)$$

$$\rho_{i,j}^n \left(\frac{\partial v}{\partial t} \right)_{i,j}^n \Delta r (j-1/2) \Delta z \Delta r = -[j p_{i,j+1/2}^n - (j-1) p_{i,j-1/2}^n] \Delta r \Delta z ; \quad (7.13)$$

$$\begin{aligned} & \rho_{i,j}^n \left(\frac{\partial E}{\partial t} \right)_{i,j}^n \Delta r (j-1/2) \Delta z \Delta r = \\ & = -(p_{i+1/2,j}^n u_{i+1/2,j}^n - p_{i-1/2,j}^n u_{i-1/2,j}^n) \Delta r (j-1/2) \Delta r - \\ & - [j p_{i,j+1/2}^n v_{j,i+1/2}^n - (j-1) p_{i,j-1/2}^n v_{i,j-1/2}^n] \Delta r \Delta z , \end{aligned} \quad (7.14)$$

где величины с дробными индексами относятся к границам ячеек, так что

$$p_{i+1/2,j}^n = (p_{i,j}^n + p_{i+1,j}^n) / 2 ; \quad (7.15)$$

$$u_{i+1/2,j}^n = (u_{i,j}^n + u_{i+1,j}^n) / 2 , \quad (7.16)$$

а производные по времени определялись как

$$\left(\frac{\partial f}{\partial t} \right)_{i,j}^n = \frac{\tilde{f}_{i,j}^n - f_{i,j}^n}{\Delta t} , \quad f = (u, v, E). \quad (7.17)$$

В результате получим для (7.1) явные конечно-разностные уравнения первого порядка точности по времени и второго по пространству

$$\tilde{u}_{i,j}^n = u_{i,j}^n - \frac{p_{i+1/2,j}^n - p_{i-1/2,j}^n}{\Delta z} \frac{\Delta t}{\rho_{i,j}^n}; \quad (7.18)$$

$$\tilde{v}_{i,j}^n = v_{i,j}^n - \frac{j p_{i,j+1/2}^n - (j-1) p_{i,j-1/2}^n}{(j-1/2)\Delta r} \frac{\Delta t}{\rho_{i,j}^n}; \quad (7.19)$$

$$\begin{aligned} \tilde{E}_{i,j}^n = E_{i,j}^n - & \left[\frac{j p_{i,j+1/2}^n v_{i,j+1/2}^n - (j-1/2) p_{i,j-1/2}^n v_{i,j-1/2}^n}{(j-1/2)\Delta r} + \right. \\ & \left. + \frac{p_{i+1/2,j}^n u_{i+1/2,j}^n - p_{i-1/2,j}^n u_{i-1/2,j}^n}{\Delta z} \right] \frac{\Delta t}{\rho_{i,j}^n}. \end{aligned} \quad (7.20)$$

В приведенных схемах \tilde{u} , \tilde{v} , \tilde{E} – промежуточные значения параметров потока на слое $t^n + \Delta t$, полученные в предположении «замороженности» поля плотности без учета эффектов перемещения среды.

Для улучшения устойчивости счета первого этапа в уравнениях из 7.6.8.1 вместо p используется $p + q$, где q – искусственное вязкостное давление (псевдовязкость) вида

$$q = -\mu \frac{\partial u}{\partial x}, \quad (7.21)$$

где μ – коэффициент вязкости.

На втором этапе расчета (лагранжевом) вычисляются эффекты переноса, учитывающие обмен между ячейками при их перестройке на прежнюю эйлерову сетку. В процессе расчета можно проводить пересчет на различные конфигурации эйлеровых расчетных сеток. На данном этапе наводятся за время Δt потоки массы ΔM^n через границы эйлеровых ячеек. При расчете полагается, что вся масса вещества переносится только за счет нормальной к границе составляющей скорости.

В цилиндрической системе координат разностная форма уравнения неразрывности принимает вид

$$\begin{aligned} \rho_{i,j}^{n+1} \Delta r (j-1/2) \Delta z \Delta r = & \rho_{i,j}^n \Delta r (j-1/2) \Delta z \Delta r - \Delta M_{i+1/2,j}^n + \Delta M_{i-1/2,j}^n \\ & - \Delta M_{i,j+1/2}^n + \Delta M_{i,j-1/2}^n. \end{aligned} \quad (7.22)$$

Для определения ΔM^n можно использовать различные формулы как первого, так и второго порядка точности, однако в последнем случае необходимо использовать искусственную вязкость. Для всех форм записи ΔM^n необходимо использовать значения параметров на границе ячейки и учитывать направление потока на данной границе, что повышает устойчивость и точность вычислений.

Устойчивый счет без введения явных членов с искусственной вязкостью обеспечивают формулы первого порядка точности, которые для цилиндрической системы координат имеют вид:

$$\Delta M_{i+1/2,j}^n = \begin{cases} \rho_{i,j}^n \frac{\tilde{u}_{i,j}^n + \tilde{u}_{i+1,j}^n}{2} (j-1/2) \Delta r^2 \Delta t, & \text{если } \tilde{u}_{i,j}^n + \tilde{u}_{i+1,j}^n > 0, \\ \rho_{i+1,j}^n \frac{\tilde{u}_{i,j}^n + \tilde{u}_{i+1,j}^n}{2} (j-1/2) \Delta r^2 \Delta t, & \text{если } \tilde{u}_{i,j}^n + \tilde{u}_{i+1,j}^n < 0. \end{cases} \quad (7.23)$$

На заключительном, третьем этапе шага по времени происходит перераспределение массы, импульса и энергии по пространству и определяются окончательные поля эйлеровых параметров потока на фиксированной сетке в момент $t^{n+1} + \Delta t$. Уравнения этого этапа представляют собой законы сохранения массы M , импульса P и энергии E , записанные для данной ячейки в разностной форме:

$$M^{n+1} = M^n + \sum \Delta M_{gp}^n, \quad (7.24)$$

$$P^{n+1} = P^n + \sum \Delta P_{cp}^n, \quad (7.25)$$

$$E^{n+1} = E^n + \sum \Delta E_{gp}^n, \quad (7.26)$$

Здесь ΔM_{gp}^n – масса газа, которая пересекла за время Δt одну из границ рассматриваемой ячейки; суммирование производится по всем сторонам ячейки. Аналогичным образом понимаются $\sum \Delta P_{cp}^n$ и $\sum \Delta E_{gp}^n$.

Уравнения (7.24–7.26) утверждают, в частности, что внутри поля течения нет источников и стоков для M , P , E , а их изменение за время Δt происходит только за счет взаимодействия на внешней границе области течения. При этом предполагается, что потоки массы через границы ячеек ΔM^n (определяемые на втором этапе) несут с собой промежуточные значения скорости и удельной энергии (вычисленные на первом этапе). Величины ΔM^n играют здесь роль весовых функций.

Исходя из этого, окончательные параметры потока $\rho, f = (u, v, E)$ на новом временном слое $t^{n+1} = t^n + \Delta t$ вычисляются по формулам

$$\rho_{i,j}^{n+1} = \rho_{i,j}^n + \frac{\sum \Delta M_k^n}{\Delta W_{i,j}}, \quad (7.27)$$

$$X_{i,j}^{n+1} = \frac{\rho_{i,j}^n}{\rho_{i,j}^{n+1}} \tilde{X}_{i,j}^n + \frac{\sum \tilde{X}_{i,j}^n \Delta M_k^n}{\rho_{i,j}^{n+1} \Delta W_{i,j}}. \quad (7.28)$$

Соотношения (7.25–7.26) справедливы, когда поток втекает в ячейку через все стороны. Для произвольной ориентации потока вводят значение функции $D_{i,j}^n(k)$, относящееся к стороне k , следующим образом:

$$D_{i,j}^n(k) = \begin{cases} 1, & \text{если поток втекает в ячейку}(i, j) \text{ через сторону } k, \\ 0, & \text{если поток вытекает из ячейки}(i, j) \text{ через сторону } k. \end{cases} \quad (7.29)$$

С использованием этой величины можно записать окончательные значения параметров $\rho, f = (u, v, E)$ на новом временном слое $t^{n+1} + \Delta t$ для произвольной ориентации потока. В цилиндрической системе координат имеем

$$\begin{aligned} \rho_{i,j}^{n+1} &= \rho_{i,j}^n + \frac{1}{\Delta W_{i,j}} (\Delta M_{i-1/2,j}^n - \Delta M_{i,j-1/2}^n + \Delta M_{i+1/2,j}^n - \Delta M_{i,j-1/2}^n), \\ \varphi_{i,j}^{n+1} &= \{ D_{i,j}^n(1) \tilde{\varphi}_{i-1,j}^n \Delta M_{i-1/2,j}^n + D_{i,j}^n(2) \tilde{\varphi}_{i,j-1}^n \Delta M_{i,j-1/2}^n + \\ &+ D_{i,j}^n(3) \tilde{\varphi}_{i+1,j}^n \Delta M_{i+1/2,j}^n + D_{i,j}^n(4) \tilde{\varphi}_{i,j+1}^n \Delta M_{i,j+1/2}^n \} / (\Delta W \rho_{i,j}^{n+1}) + \\ &+ \tilde{\varphi}_{i,j}^n \{ \Delta W_{i,j} \rho_{i,j}^n - [1 - D_{i,j}^n(1)] \Delta M_{i-1/2,j}^n - [1 - D_{i,j}^n(2)] \Delta M_{i,j-1/2}^n - \\ &- [1 - D_{i,j}^n(3)] \Delta M_{i+1/2,j}^n - [1 - D_{i,j}^n(4)] \Delta M_{i,j+1/2}^n \} / (\Delta W_{i,j} \rho_{i,j}^{n+1}). \end{aligned} \quad (7.30)$$

В целом разностная схема метода крупных частиц является дивергентно-консервативной, то есть законы сохранения выполняются как для ячейки, так и для всей сеточной области.

Граничные условия

Граничные условия при расчетах газодинамических течений подразделяются на условия на границах счетной зоны и на границах твердых тел. В свою очередь, на границе счетной зоны могут быть условия трех видов – граница с постоянными параметрами, свободная граница и ось симметрии. Задание граничных условий обеспечивается с помощью рядов фиктивных ячеек, куда засылаются соответствующие значения из смежных ячеек потока. Число таких слоев определяется порядком разностной схемы (для первого порядка – один слой и т.п.). Для границы с постоянными параметрами в фиктивном слое задаются постоянные значения газодинамических параметров. Для свободной границы значения газодинамических параметров принимаются равными значениям в соседнем слое счетной области (нулевая аппроксимация). На оси симметрии обычно ставится условие симметрии потока или условие непротекания. При разработке программного комплекса целесообразно предусмотреть возможность задания на границах различных вариантов граничных условий.

На границах твердых тел задаются условия непротекания или условия прилипания в случае расчета течения вязкого газа. Для условия непротекания нормальная к поверхности компонента скорости на границе твердого тела обращается в ноль, а тангенциальная компонента остается неизменной. Для условия прилипания обращаются в ноль обе компоненты скорости. В обоих случаях остальные параметры потока сносятся в фиктивную ячейку без изменения.

При сверхзвуковом течении характер граничных условий на свободной границе счетной зоны не вносит каких-либо осложнений, так как возму-

щения, распространяющиеся со скоростью звука, сносятся потоком. При дозвуковом или трансзвуковом течении необходимо выбирать свободную границу счетной зоны достаточно далеко от источников возмущений, тогда методы экстраполяции потока за границы счетной зоны возможны.

Приведенные выше формулы метода крупных частиц справедливы для целых ячеек, т.е. для случая, когда контур тела совпадает с границами ячеек. При рассмотрении тела общей формы граница его контура будет пересекать расчетную сетку, в результате чего образуются дробные ячейки, параметры течения в которых необходимо определять.

Существуют различные подходы к расчету течений вдоль криволинейных границ, например, расчет в координатах s, n (где s – дуга вдоль тела, n – нормаль к поверхности тела), преобразование координат [10], использование ячеек треугольной формы [11], использование дробных ячеек [12]. Например, в классическом варианте метода крупных частиц предусмотрено использование дробных ячеек, образующихся при замене реального контура тела отрезками прямых, соединяющими точки пересечения контура с границами эйлеровой сетки.

Однако следует отметить, что все методы аппроксимации криволинейных границ значительно усложняют алгоритм вычислений и приводят к значительному, многократному увеличению времени счета. В связи с этим в созданном комплексе отсутствует реализация специальной аппроксимации границ и используются только целочисленные прямоугольные ячейки. Такой подход значительно упрощает алгоритм вычислений, обеспечивает задание границ твердых тел достаточно сложной конфигурации, и при выборе достаточно мелкой сетки дает достаточно качественное представление о структуре течения. Целесообразность подобного подхода очевидна для расчетов течений при наличии большого числа тел, с произвольной конфигурацией, а также для качественного анализа структуры течения.

7.2.3. Структура интерфейса пакета GDT

Система начальной конфигурации

Система является одной из основных в пакете GDT. В ней формируется проект, включающий в себя сценарий расчета, геометрическую конфигурацию проекта, постановку начальных и граничных условий, возможность добавления датчиков в проект. Система позволяет оперативно изменять свойства объектов, включенных в проект, и свойства самого проекта. Это может быть изменение положения и геометрии объектов, их внутренних свойств, характеристик стадий расчетов, параметров физических подмоделей и других свойств. Проект должен содержать как минимум одну стадию расчета, состоящую из определенного количества шагов некоторой продолжительности. Проект также содержит информацию об установленных в счетной области датчиков. Конфигурация задачи на каждой стадии расчета может изменяться, включая изменение граничных условий, геометрии и шага интегрирования.

При определении конфигурации используются объекты, называемые областью. Область – это регион в расчетной области, имеющий специфические физические параметры. Каждая область описывается тремя группами параметров:

1) геометрия описывает форму и местоположение объекта, область внутри расчетной области. Геометрия определяется с помощью геометрических элементов;

2) тип области описывает совокупность ее физических параметров (например, газ это или тело);

3) физические параметры области.

Существуют следующие типы областей: газ(жидкость), тело, взрывчатое вещество, источник энергии, неизменяемая область.

Иногда требуется получить особенные количественные результаты для решения задачи. Обычно вызывает интерес динамическое изменение одного или нескольких параметров в некоторой точке области, где решается задача. При физическом эксперименте в этом случае используют датчики или метки (маркеры). Датчики в программе полностью аналогичны экспериментальным датчикам. Отличительное свойство пакета состоит в возможности поместить датчик в любую точку расчетной области. При расчете динамическое изменение параметров записывается датчиком и сохраняются в файл на диске, который можно переслать на другой компьютер и использовать другими программами. Датчик позволяют записывать все параметры, считающиеся в данной задаче.

Постановка граничных условий

При задании граничных условий для 3D задач используются 2D элементы – точка (2D), прямоугольник, многоугольник, круг, эллипс.

Граничное условие – специальный тип области, используемый в 2D задачах. Эта область применяется для граничных условий на внешних границах расчетной области. Для определения граничного условия используются следующие параметры:

1) *edge* – показывает, к какой внешней границе принадлежит элемент. Существует всего четыре границы: *Left*, *Right*, *Top* и *Bottom*;

2) *min* и *max* – максимальная и минимальная координаты (в ячейках области) примитива.

Постановка граничных условий разработаны для задания грани, на которой необходимо определить конфигурацию граничных условий.

7.2.4. Система сохранения и восстановления проектов

Данная система позволяет сохранять и восстанавливать данные в журнале данных. Система сохранения данных разработана для выбора из журнала данных ранее сохраненных результатов для возобновления счета, визуализации или удаления ненужных вычислений. В ней содержится протокол сохраненных вычислений в журнале данных. Существует импорт в проект данных в различных выходных форматах. Каждая запись в списке содержит номер шага вычисления, при котором были сохранены данные, и время, истекшее с начала физического процесса. Для восстановления данных с целью использования в дальнейших вычислениях, необходимо выбрать запись в журнале данных.

1. Система выходных данных

Визуализация данных является неотъемлемой частью современного научного исследования и анализа явлений практически в любой отрасли естественных наук. Графические представления в форме цветовых распределе-

ний или функциональных зависимостей значительно упрощают восприятие информации человеческим мозгом и способствуют более глубокому и оперативному анализу сложных процессов и явлений. Это особенно важно при обработке больших трехмерных массивов, с которыми в основном приходится иметь дело при численном моделировании, обработке экспериментальных или аналитических данных.

В методике применяется встроенная система визуализации **ScientificVR (SVR)**.

SVR основан на модульной многослойной архитектуре, позволяющей дополнять установленный пакет новыми функциональными возможностями при помощи подключения внешних модулей (plug-in). Используя специфичные внешние модули, можно использовать один и тот же пакет для работы с самыми разнообразными данными и в самых различных предметных областях.

Систему визуализации **SVR** можно использовать отдельно от методики. Для этого необходимо сохранить текущий проект, сохранить данные, выйти из программы и открыть файл проекта программой **ScientificVR**.

Модульная структура ScientificVR

Традиционные системы визуализации состоят их трех основных частей: подсистемы **загрузки данных**, подсистемы **создания изображений** и подсистемы **вывода изображений**. Подсистема загрузки считывает данные в известном ей формате и передает их в подсистему создания изображений. Та, в свою очередь, формирует изображение, используя загруженные данные. Далее, полученное изображение передается подсистеме вывода, которая выводит изображение на экран или сохраняет его в определенном формате. Какие недостатки присущи традиционной архитектуре?

- Подсистема **загрузки** способна обрабатывать только данные, представленные в определенном формате, реже в нескольких различных форматах. Однако данные пользователя чаще всего хранятся в своем собственном формате, который обычно не поддерживается подсистемой загрузки данных визуализатора. Поэтому для того, чтобы использовать эти данные, необходимо применять специальные средства, которые преобразуют данные пользователя в формат, совместимый с подсистемой загрузки данных визуализатора.

- Подсистема **вывода изображений** также ограничена одним или несколькими форматами сохранения изображений. В случае, если пользователь желает вывести изображение в отличном от поддерживаемых формате, он будет вынужден воспользоваться средствами преобразования изображения в нужный формат.

- Подсистема **создания изображений** способна создавать только те типы изображений, которые в ней заложены. А поскольку различным категориям пользователей требуется создавать изображения одних типов, а изображения других типов не требуются, часто складывается такая ситуация, что при всем богатстве средств визуализации пользователь не может выбрать такое, которое бы его полностью удовлетворило.

Система визуализации **ScientificVR** разработана таким образом, чтобы устранить подобные недостатки. Ее архитектура является более совершенной и гибкой, чем архитектура традиционных систем визуализации. Глав-

ной особенностью этой архитектуры является возможность неограниченно-го расширения каждой из пяти подсистем:

- загрузка данных;
- преобразования координат;
- функциональные преобразования;
- создание изображений;
- вывод изображений.

Это достигается благодаря тому, что любая подсистема представляет собой совокупность подключаемых модулей, каждый из которых выполняет одну специфическую функцию. Например, каждый подключаемый модуль для подсистемы загрузки данных обеспечивает ввод информации, хранимой в каком-то одном формате. Таким образом, добавляя к подсистеме подключаемые модули, можно обеспечить загрузку данных, хранящихся в абсолютно произвольном формате, при этом возникает возможность одновременной обработки данных различной природы (например, можно создавать изображения с одновременной визуализацией экспериментальных и численных результатов). Если набор подключаемых модулей, поставляемых с системой, по той или иной причине не удовлетворяет потребностям пользователя, имеется возможность или найти подходящие модули (например, в интернете), или создать нужные модули самостоятельно, используя практически любые доступные инструментальные средства.

Визуализаторы

Основным инструментом в ScientificVR является визуализатор. Визуализаторы определяют, каким способом будет представлена та или иная переменная.

Визуализацию скалярных данных поддерживают несколько визуализаторов:

- 1) curve visualizer (для одномерных данных);
- 2) color plane visualizer (для двухмерных данных);
- 3) isoline visualizer (для двухмерных данных);
- 4) voxel visualizer (для трехмерных данных);
- 5) isisurface visualizer (для трехмерных данных).

Способ представления одномерной скалярной величины в виде графика является одним из самых простых и удобных. Эту задачу выполняет Curve visualizer.

Наиболее наглядным и эффективным способом представления двухмерного распределения скалярной величины в графическом виде является изображение ее в виде точек на экране компьютера. При этом каждая точка может быть окрашена в цвет из некоторой палитры, а цвет этой точки соответствует числовому значению параметра. Эту задачу выполняет **Color plane visualizer**.

Часто удобным видом представления распределения двухмерного параметра является построение его изолиний. В системе визуализации ScientificVR эту задачу выполняет **Isoline visualizer**.

Изоповерхности используются для визуализации трехмерных полей и являются трехмерным аналогом изолиний.

Для представления распределения трехмерных параметров применяется уникальная технология, основанная на воксельной графике с использованием полупрозрачных цветовых палитр. Выполнение этой задачи берет на себя визуализатор Voxel visualizer.

Визуализацию векторных данных поддерживают два визуализатора Vectors Visualizer и Stream Lines Visualizer.

Изображение векторов традиционно используется для визуализации двухмерных и трёхмерных векторных полей.

Stream Lines Visualizer – используется для визуализации линий тока.

Вывод изображений

SVR обладает широким спектром функциональных возможностей, способов представления данных, различных операций над скалярными и векторными массивами, типами представлений изображений.

Трёхмерная воксельная графика

Для представления распределения трехмерных параметров применяется уникальная технология, основанная на воксельной графике с использованием полупрозрачных цветовых палитр.

Изоповерхности

Изоповерхности используются для визуализации трехмерных полей и являются трехмерным аналогом изолиний. Помимо окраски поверхностей цветом любого выбранного параметра, имеется возможность делать изоповерхности с различной степенью прозрачности.

Двухмерные и трехмерные векторы

Изображение векторов традиционно используется для визуализации двухмерных и трехмерных векторных полей. Длина вектора и его цвет могут быть использованы для одновременного представления нескольких параметров.

Графики

Способ представления одномерной скалярной величины в виде графика является одним из самых простых и удобных.

Представление двухмерных скалярных данных с помощью цвета.

Наиболее наглядным и эффективным способом представления двухмерного распределения скалярной величины в графическом виде является изображение ее в виде точек на экране компьютера. При этом каждая точка может быть окрашена в цвет из некоторой палитры, причем цвет этой точки соответствует числовому значению величины.

Изолинии

Удобным видом представления распределения двухмерного параметра является построение его изолиний. Цвет изолиний может зависеть от числового значения этого или другого параметра.

Комбинированные изображения

Вышеуказанные типы представления данных могут быть скомбинированы произвольным образом. Это позволяет осуществлять комплексный анализ сложных явлений и одновременно представлять распределения произвольного набора параметров.

Для удобства анализа визуализатор SVR предоставляет пользователю следующие дополнительные возможности.

Стереовизуализация

Позволяет пользователю с помощью специальной аппаратуры (видеокарта с поддержкой стерео и стереочки или два проектора с фильтрами и специальный настенный экран) увидеть объемное изображение. Данная возможность является чрезвычайно ценной, поскольку позволяет производить более качественный анализ очень сложных процессов и способствует пониманию всех их нюансов.

Анимация

SVR поддерживает три типа анимации:

- создание анимационного ролика, показывающего протекание процесса во времени;
- создание анимационного ролика, показывающего вращение визуализируемой области, что позволяет рассматривать ее с различных точек;
- комбинация предыдущих типов.

В SVR реализован широкий набор средств для сохранения полученных результатов:

- сохранение всего проекта;
- сохранение картинки в различных графических форматах: PNG, BMP, TIFF, JPEG, EPS;
- сохранение видеороликов в видео форматах, поддерживаемых операционной системой;
- вывод полученного изображения на различные типы печатающих устройств.

Одним из нововведений в системе визуализации ScientificVR является возможность стереоскопического представления трехмерных изображений. Для использования этой возможности пользователь должен установить на своем компьютере специальную видеокарту, поддерживающую стереорежим монитора и позволяющую использовать стереочки (например, карту ASUS 7100 Deluxe). Создание стереоизображений возможно для любого трехмерного типа визуализации – воксельных картинок, изоповерхностей, трехмерных представлений тел, векторов или их комбинаций. Созданные стереоизображения могут быть записаны в AVI-файл со всеми дополнительными возможностями анимации.

В программе реализовано сохранение полученного изображения в различных графических форматах:

- BMP – (Bitmap) стандартный формат, используемый Windows для сохранения изображения. Число бит на пиксел в BMP файле зависит от заголовка файла и варьируется в диапазоне от 1 до 64. Наибольшее распространение получили 24-битные BMP файлы;
- PNG – (Portable Network Graphics) формат с алгоритмом эффективного сжатия изображений, альтернативный формату GIF. Подобно формату GIF алгоритм сжимает данные без потери качества. Может сохранять цветное изображение, используя 8, 24, 48 бит на пиксел и черно-белое с 1, 2, 4, 8, или 16 битами на каждый пиксел. В PNG файлах может также сохраняться значение непрозрачности для каждого пиксела, определяющей степень с которой цвет данного пиксела сочетается с цветом фона (background color);

- TIFF – (Tag Image File Format) очень гибкий формат, поддерживаемый различными платформами и графическими приложениями. Может сохранять изображения с любым количеством бит, выделяемых на пиксель и применять различные алгоритмы сжатия. Этот формат позволяет сохранять несколько изображений в один многостраничный TIFF файл. Использование тегов (tag) делает возможным записывание информации об изображении, например, вид компрессии, дату создания в файл вместе с самим изображением;

- JPEG – (Joint Photographic Experts Group) эта схема сжатия хорошо подходит для работы с естественными картинками, такими как отсканированные фотографии. Некоторая информация теряется при сжатии, но эти потери незаметны для человеческого глаза. Этот алгоритм выделяет 24 бита на пиксель, что делает возможным получение изображения с количеством цветов более 16 миллионов. JPEG не поддерживает анимацию.

- EPS – (Encapsulated PostScript) этот графический формат очень распространен в научном мире и используется в подавляющем количестве научных статей.

В многофункциональном визуализаторе ScientificVR реализована возможность отправления на печать презентаций.

Также программный комплекс позволяет производить визуализацию требуемых параметров в реальном времени непосредственно во время расчета (визуализация «on-the-fly»), что существенно расширяет возможности по наблюдению за особенностями протекания нестационарных процессов.

1. Справочная система.

Это система помощи, предоставляемая пользователю разработчиком. Она описывает функциональность программы, предоставляет информацию о физических моделях и разностных схемах, текущей версии программы.

Справочная система состоит из следующих элементов: содержание, указатель, поиск, search, о программе.

7.2.5. Моделирование динамики взрыва методом крупных частиц

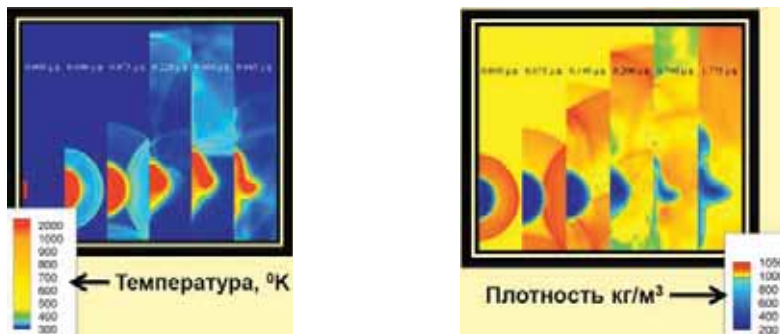


Рис. 7.3. Динамика парогазового пузыря, деформируемого в результате воздействия волн сжатия и разрежения, отраженных от стенок корпуса (М.Ф. Иванов)

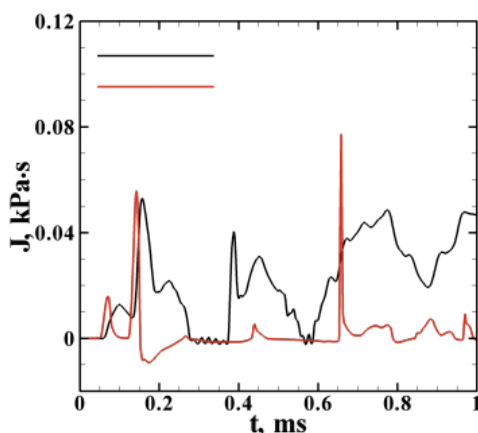


Рис. 7.4. Моделирование сравнения энерговыведения от дуги при коротком замыкании (черная кривая) и энерговыведения от взрыва заряда ТНТ, моделирующего пробой (красная кривая)

7.2.6. Расчет трансформатора мощности на основе ТДЦН-100

Модельный трансформатор мощности (на основе ТДЦН-100). Расчет для трансформаторов других типов и вводов выполняется аналогичным образом. В начальный момент возникает энерговыведение вследствие короткого замыкания и далее прикладывается постоянное давление или оно растет по линейному закону. Далее моделируется возникновение волн давления и/или детонации в зависимости от используемых моделей горения и детонации.

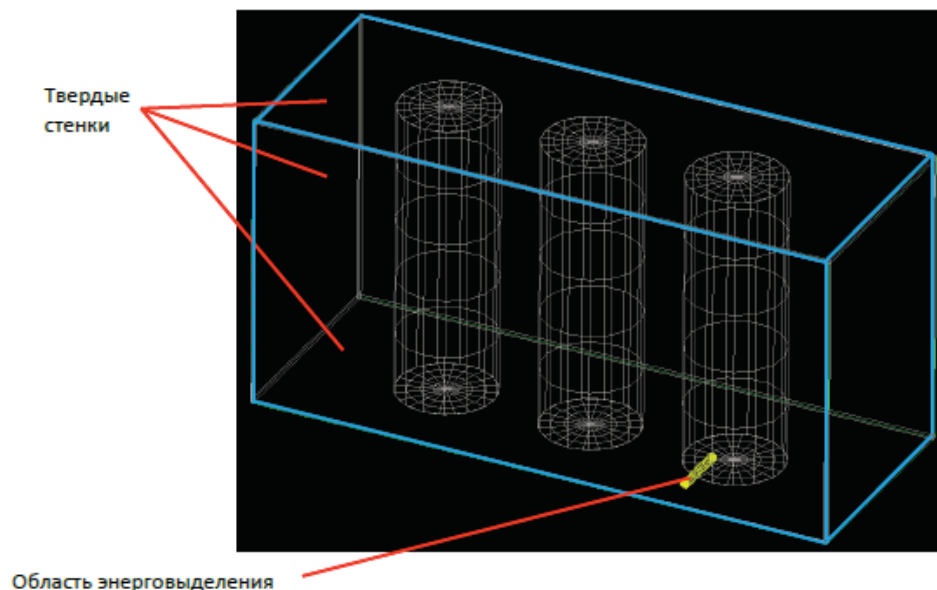
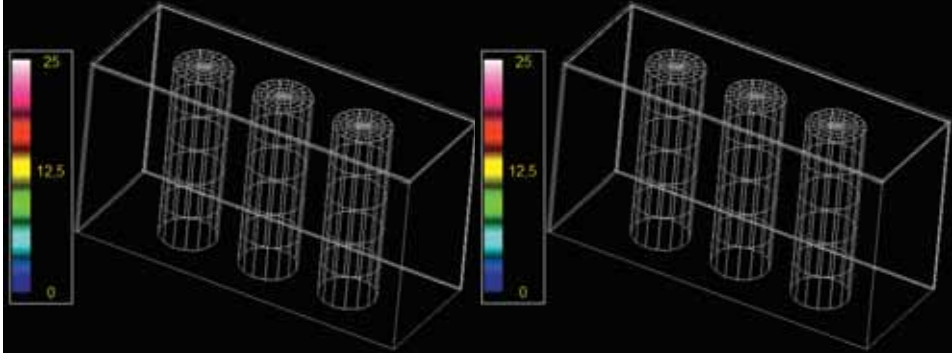
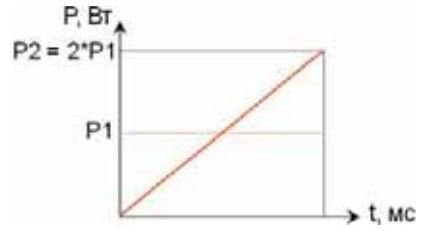
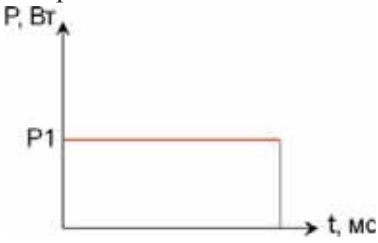
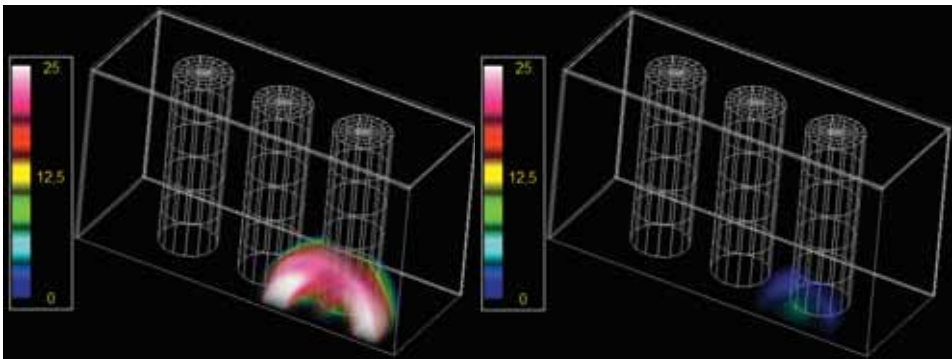


Рис. 7.4. Расчетная схема трансформатора ТДЦН-100

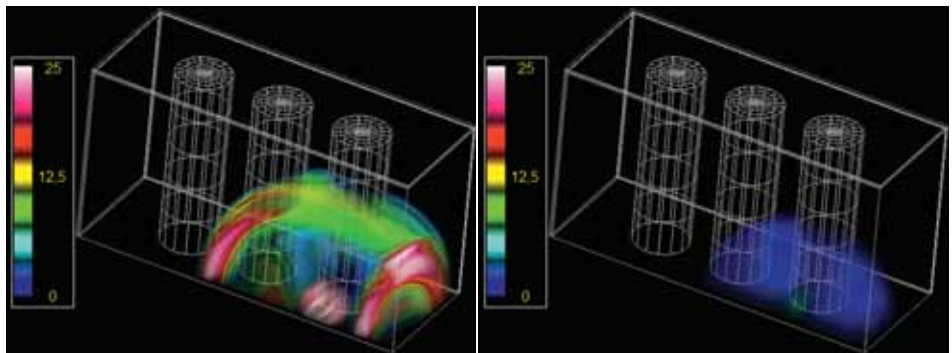
Избыточное давление (в атмосферах) при постоянном и линейно растущем энергосвободении.



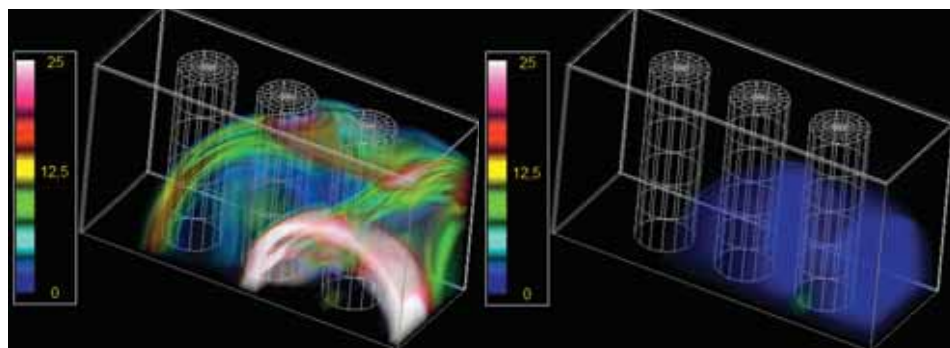
Время 0 мс



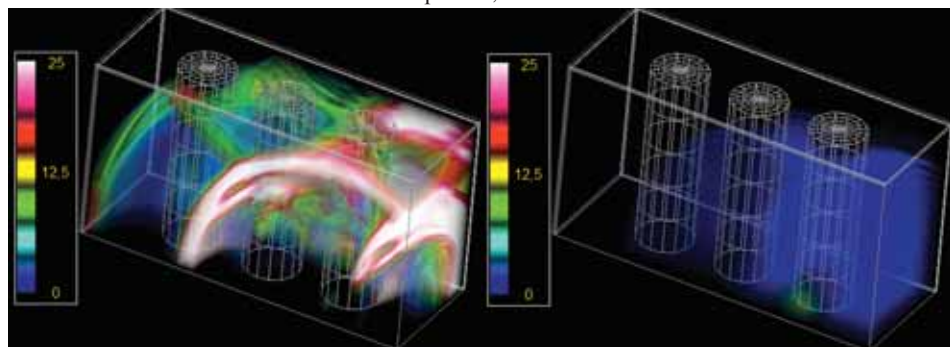
Время 0,25 мс



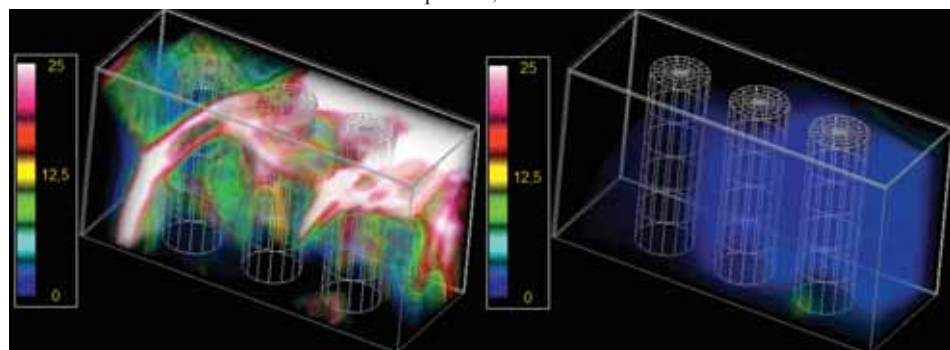
Время 0,50 мс



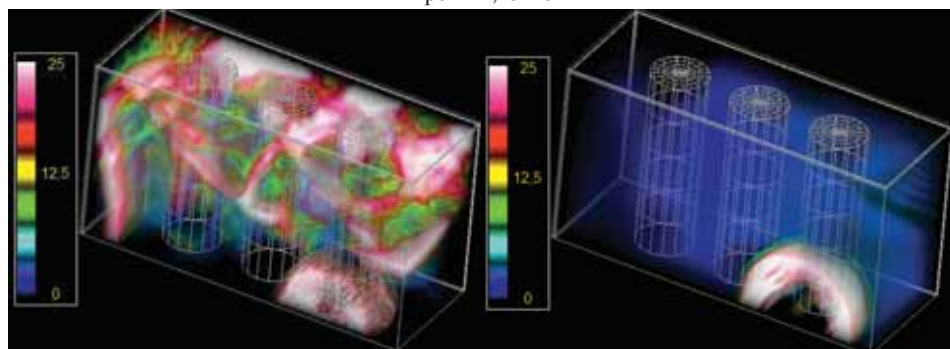
Время 0,75 мс



Время 1,00 мс



Время 1,25 мс



Время 1,50 мс

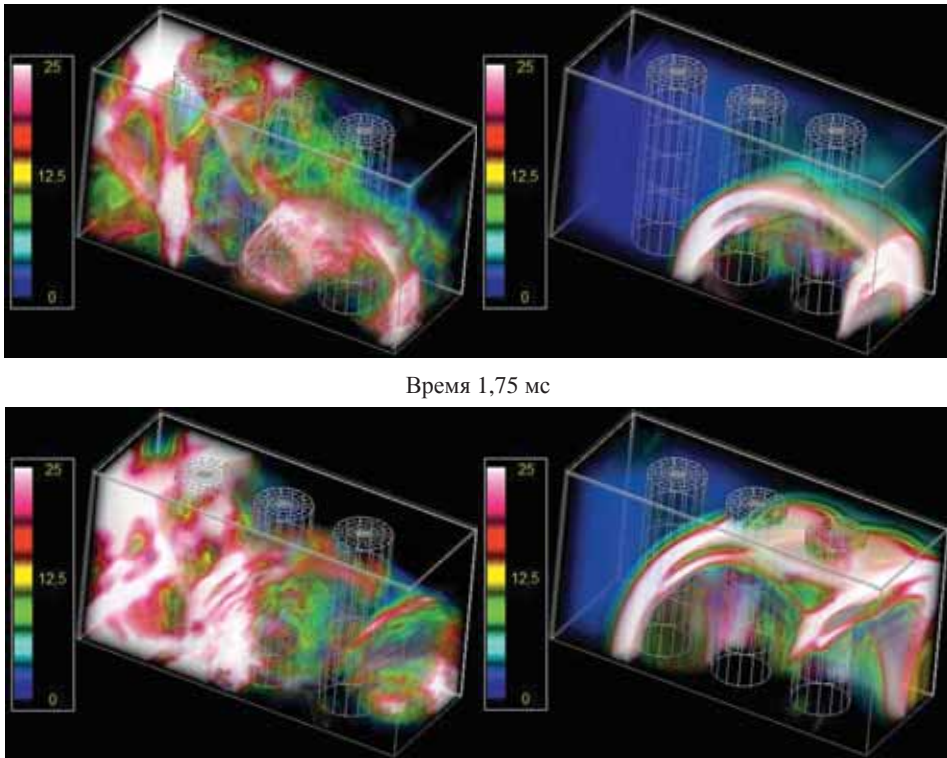


Рис. 7.5. Эпюры давления и поля давлений в различные моменты времени (0–2 мс)

В программном комплексе применяется вычислительная сетка с равномерными кубическими ячейками. Использование равномерной сетки позволяет уменьшить вычислительные искажения в результатах решения задачи, особенно в случае моделирования сверхзвуковых течений. Точность результатов расчетов с использованием данной сетки подтверждена многочисленными сравнениями с результатами экспериментов, показавшими хорошее совпадение. Помимо этого, выбранная сетка обладает рядом преимуществ при проведении параллельных вычислений. Ее использование позволило разработчикам добиться масштабируемости, близкой к идеальной. Таким образом, созданный программный комплекс весьма эффективно использует ресурсы вычислительных систем.

Препроцессор программного комплекса позволяет задавать размеры расчетной области, выбирать тип используемой модели, задавать все необходимые параметры для жидкостей и твердых тел, формировать геометрию расчетной области с использованием как набора геометрических примитивов, так и путем импорта геометрических объектов из STL-файлов, задавать различные шаг по времени и граничные условия для разных этапов расчета. Также препроцессор позволяет устанавливать в любой точке расчетной области виртуальные датчики, которые в ходе расчета записывают в файл информацию о том, как меняются интересные пользователя параметры в этой точке с течением времени.

Постпроцессор программного комплекса создан на основе отечественной системы научной визуализации Scientific VR. Он получает результаты расчета

с узлов вычислительной системы в режиме реального времени (визуализация «на лету») и создает на их основе графические изображения и анимационные файлы с использованием новейших технологий визуализации, включая трехмерную полупрозрачную графику и стереоизображения. Это дает пользователю возможность контролировать ход расчета и, в случае обнаружения ошибок, допущенных на этапе создания проекта, позволяет своевременно их устранить.

Важной особенностью программного комплекса является поддержка параллельных вычислений на многопроцессорных вычислительных системах (вычислительных кластерах). Кластеры позволяют в сотни раз увеличить скорость счета по сравнению с персональным компьютером, для них практически не действуют ограничения на объем оперативной памяти. Созданный программный комплекс обладает хорошими характеристиками по использованию процессоров вычислительного кластера; коэффициент эффективности достигает 0,9–0,98. Однако и на персональном компьютере программный комплекс позволяет решать задачи такой сложности, которая не по силам конкурентам при той же конфигурации компьютера.

Помимо этого, программный комплекс обладает удобным и понятным пользовательским интерфейсом, что делает работу с ним приятной, а процесс обучения пользователя легким и непродолжительным.

Программному комплексу доступен широкий диапазон программных и аппаратных платформ, на которых он может работать (5).

Таблица 7.2

Процессор	Операционные системы	Компиляторы	Устройства для связи	Программное обеспечение для связи
Intel Pentium (x86 family)	Linux (Red Hat 8.3, 8, 9; Debian 3.0; другие современные дистрибутивы).	Visual C++ 6	Ethernet	MPICH 1.2.x
		Visual C++ .NET	Myrinet	MPICH-GM 1.2.5..12 >
	Solaris 8	GCC 2.95	SCI	LAM 6.x
		GCC 2.96		LAM 8.0
		PGI C++ 5		SCALI SSP 2.x, 3.x
		Intel C++ 5 (Win)		MP-MPICH 1.2.0
		Intel C++ 6 (Win)		
Intel C++ 8.1				
Intel C++ 8.1				
AMD Opteron (AMD-64)	SuSE Linux Enterprise Server 8.1	GCC 3.2, 3.3	Myrinet 2000	MPICH 1.2.x
		PGI C++ 5	Ethernet	MPICH-GM 1.2.5..12 >
				LAM 6.x
LAM 8.0				
Sun UltraSPARC 32-bit	Solaris 2.6	Sun Workshop C++ 5	Ethernet	MPICH 1.2.x
		GCC 2.95		LAM 6.x

Таблица 7.2. Продолжение

Intel Ithanium 2 (IA-64)	Linux Red Hat 8.3	Intel C++ 7	Ethernet	MPICH-GM 1.2.5..12 >
		Intel C++ 8	Myrinet 2000	
PowerPC G5	Linux	GCC		
	MacOS X 10			

Программный комплекс может эффективно использоваться на многопроцессорных вычислительных системах (с общей памятью либо кластерных). Следует отметить, что существует «гибридный» вариант комплекса для МВС, в котором солверная (отвечающая за вычисления) часть находится на кластере, а управляющий модуль с графический интерфейс пользователя – на отдельной машине. Последняя может управляться операционной системой, отличной от той, что стоит на МВС, и быть связанной с кластером через локальную сеть или Интернет. При этом пользователь, работающий на управляющей машине, практически не видит разницы по сравнению с версией для персональных компьютеров. «Гибридный» вариант комплекса для МВС поддерживает все возможности по визуализации, в том числе и визуализацию “на лету”.

Программный комплекс способен рассчитывать до 20 миллионов трехмерных ячеек на каждый гигабайт оперативной памяти.

Самая большая расчетная область, обработанная при помощи созданного программного комплекса, содержала 1,92 миллиарда трехмерных ячеек. Расчет производился на 128-узловом кластере с процессорами Dual Xeon EM64T 3.2 GHz. Расчет одного шага занял приблизительно 17 секунд.

Для созданного программного комплекса были проведены измерения масштабируемости (рис. 7.6). В качестве тестовой системы использовался 128-узловой кластер с процессорами Dual Xeon EM64T 3.2 GHz.

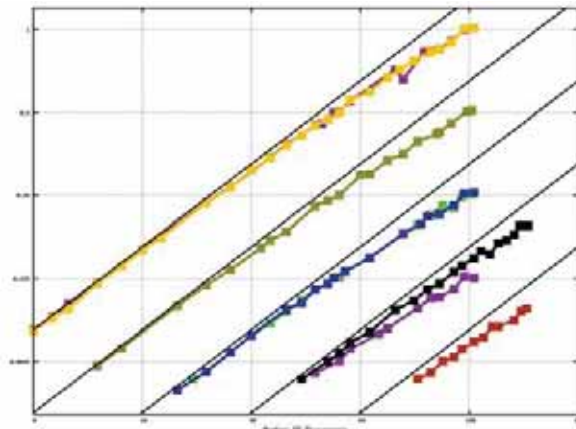


Рис. 7.6. Результаты тестирования масштабируемости созданного программного комплекса

7.3. Моделирование автотрансформатора Siemens FS на пакете GDT

Тестирование комплекса на пакете GDT проводилось с допущением об абсолютно твердых элементах конструкции трансформатора.

На рис. 7.8. – 7.14 приведены схема и результаты расчетов (в виде распределения избыточного давления) для короткого замыкания с суммарной энергией дуги 400 кДж и временем ее существования 4 мс. Выделение энергии принималось равномерным по времени.

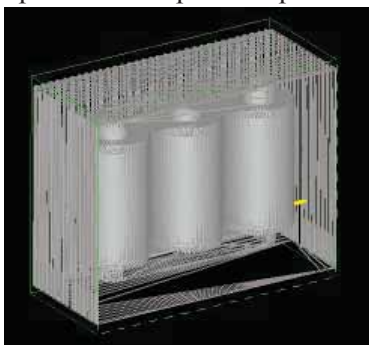


Рис. 7.8. Схема тестового расчета автотрансформатора Siemens для короткого замыкания с суммарной энергией дуги 400 кДж и временем ее существования 4 мс

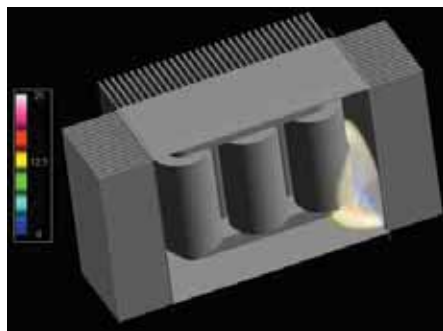


Рис. 7.8. Распределение избыточного давления в трансформаторе Siemens, $t = 4$ мс

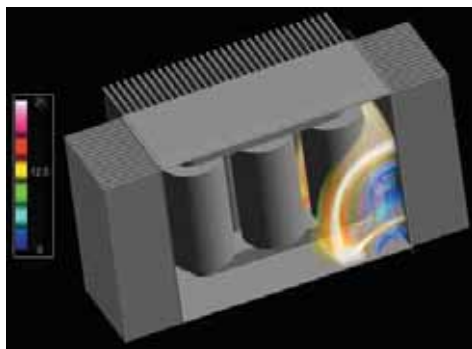


Рис. 7.9. Распределение избыточного давления в трансформаторе Siemens, $t = 8$ мс

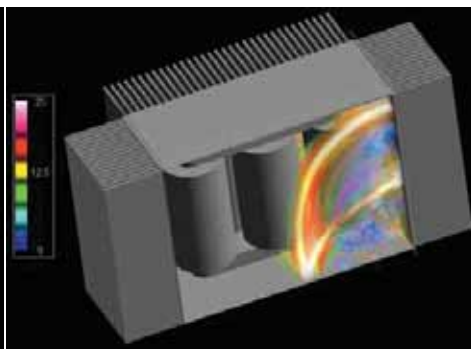


Рис. 7.10. Распределение избыточного давления в трансформаторе Siemens, $t = 12$ мс

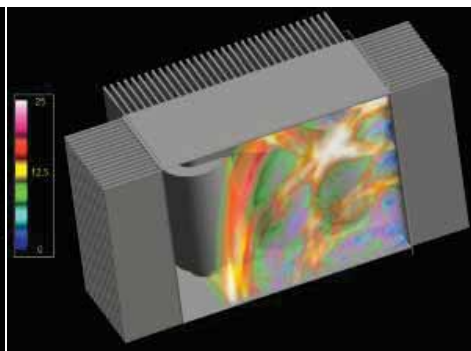
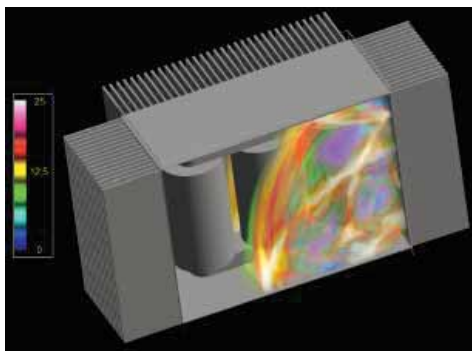


Рис. 7.11. Распределение избыточного давления в трансформаторе Siemens, $t = 16$ мс и $t = 20$ мс

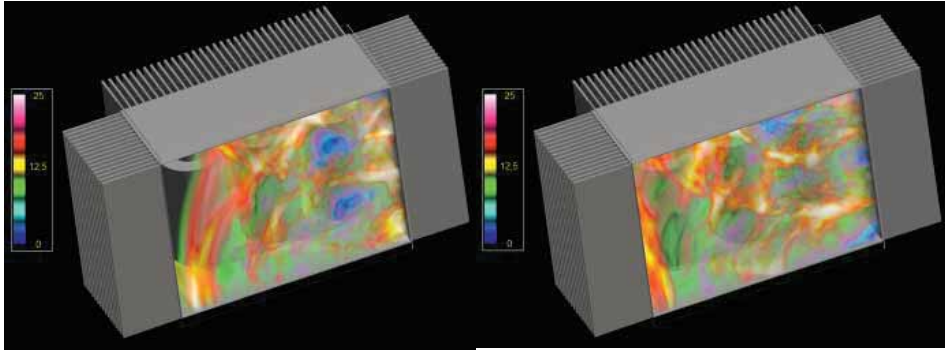


Рис. 7.12. Распределение избыточного давления в трансформаторе Siemens, $t = 24$ мс и 28 мс.

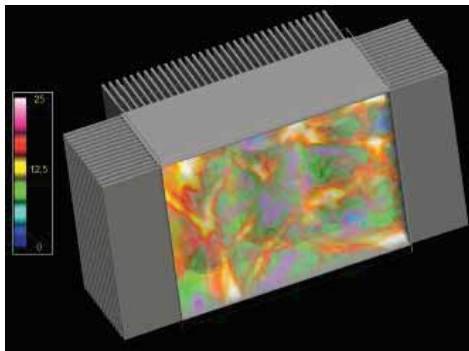


Рис. 7.13. Распределение избыточного давления в трансформаторе Siemens, $t = 32$ мс.

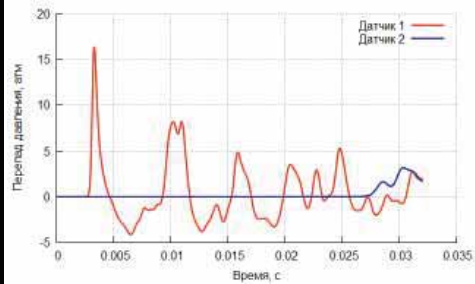


Рис. 7.14. Величины перепада давления, полученные с датчиков 1 и 2 для автотрансформатора компании Siemens.

В ходе тестовых расчетов были получены данные с виртуальных датчиков, позволяющие определить нагрузку на корпус трансформатора. На рис. 7.14 приведены величины перепада давления, полученные с датчиков, обозначенных на рис. 7.8.

7.4. МОДЕЛИРОВАНИЕ МАКЕТНОГО ОБРАЗЦА ТРАНСФОРМАТОРА ТВМА-40/6

Тестирование комплекса GDT проводилось с допущением об абсолютно твердых элементах конструкции трансформатора.

На рис. 7.15–7.16 приведены схема и результаты расчетов (в виде распределения избыточного давления) для короткого замыкания с суммарной энергией дуги 400 кДж и временем ее существования 4 мс. Выделение энергии принималось равномерным по времени.

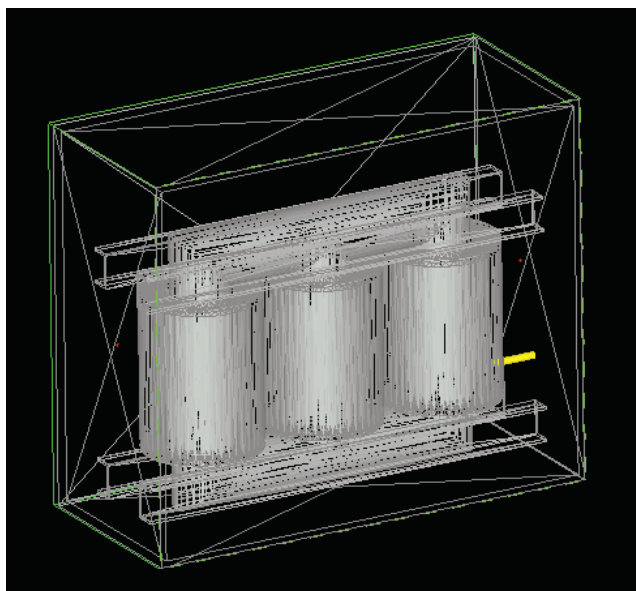
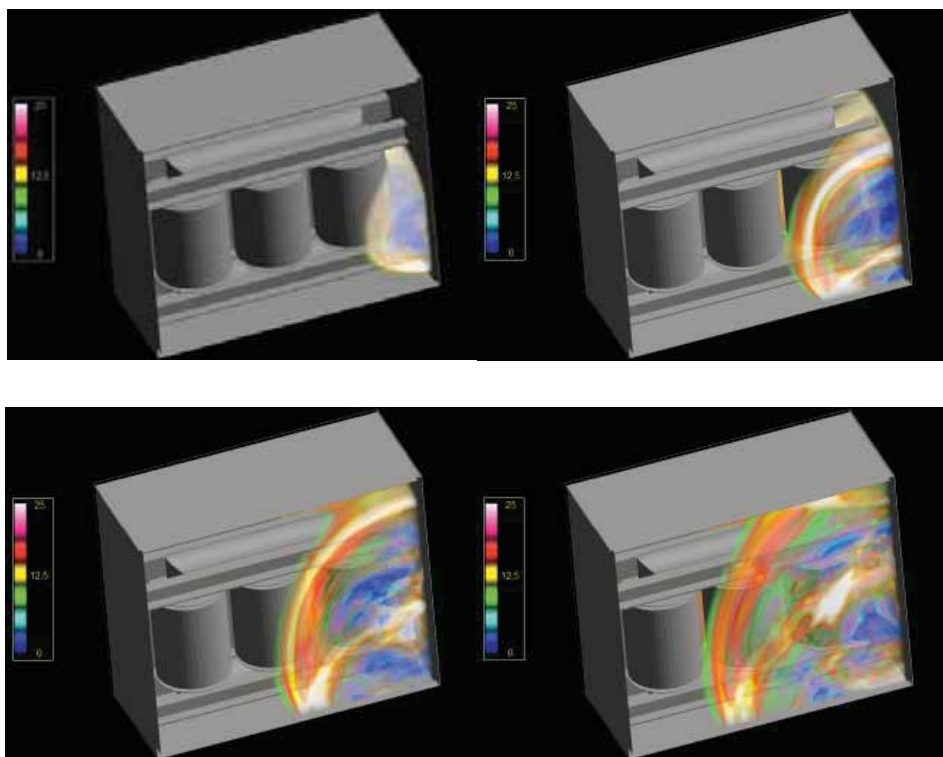


Рис. 7.15. Схема тестового расчета макетного образца трансформатора для короткого замыкания с суммарной энергией дуги 400 кДж и временем ее существования 4 мс.



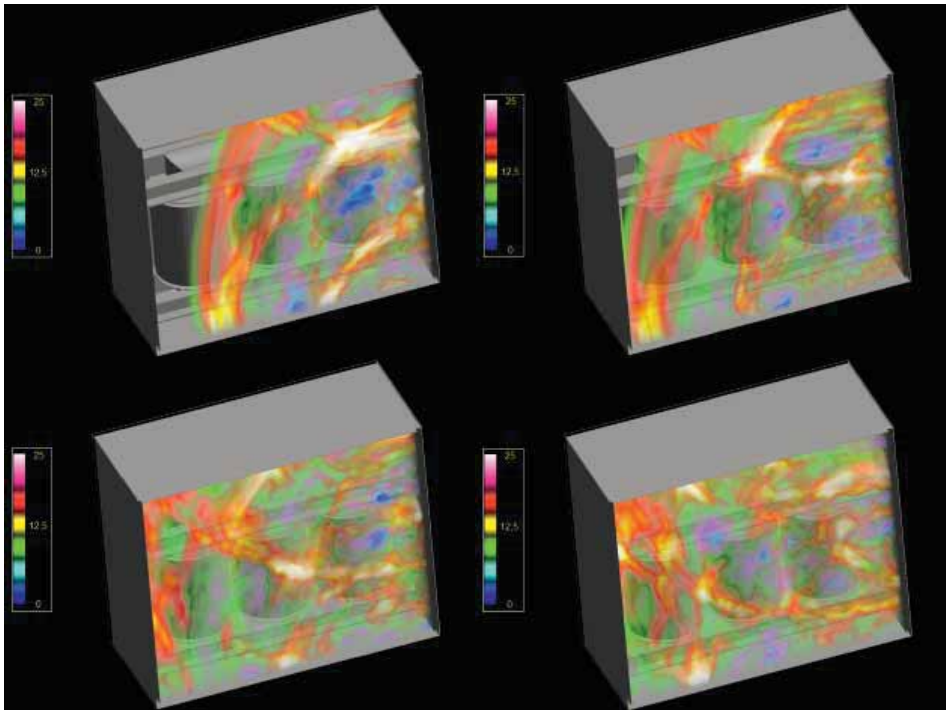


Рис. 7.16. Распределение избыточного давления в образце, $t = 4, 8, 12, 16, 20, 24, 28, 32$ мс

Заключение

В ходе тестовых расчетов было установлено, что созданный программный комплекс на основе GDT для расчета взрыва макетных образцов взрывобезопасного маслonaполненного автотрансформатора напряжением 220/110 кВ IV габарита при внутренних КЗ позволяет удовлетворительно моделировать газогидродинамические процессы, протекающие в маслonaполненных автотрансформаторах при внутренних коротких замыканиях.

7.5. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ ВМЭО НА ПАКЕТАХ ANSYS – LS DYNA

7.5.1. Метод Эйлера-Лагранжа моделирования многокомпонентных течений сжимаемых сред на адаптивных сетках

Математическое моделирование является одним из наиболее эффективных способов оценки прочности, прогнозирования долговечности, оптимизации конструкций и технологических процессов производства, в основе которых лежат процессы удара и взрыва.

Одной из наиболее эффективных систем автоматизированного инженерного анализа и нестационарных процессов деформирования является многоцелевая программа LS-DYNA, предназначенная для решения трехмерных динамических нелинейных задач механики деформируемого твердого

тела, механики жидкости и газа, теплопереноса, а также связанных задач. Программа LS-DYNA применяется для решения задач соударения, взрыва, обработки металлов давлением и ряда других задач. В программе реализованы эффективные методы решения перечисленных выше задач, в том числе явный и неявный метод конечных элементов, реализованы процедуры автоматической перестройки и сглаживания конечно-элементной сетки при вырождении элементов, произвольные лагранжево-эйлеровые сетки, высокоэффективные алгоритмы решения контактных задач, широкий набор моделей материалов, возможности пользовательского программирования, а также процедуры лагранжево-эйлерового связывания и расчета многокомпонентных течений сжимаемых сред на подвижных эйлеровых сетках. Программный код LS-DYNA оптимизирован под основные платформы и операционные системы, векторизован, распараллелен для систем с общей (SMP) и распределенной памятью (MPP).

На основании этого было принято решение применить программу LS-DYNA для анализа отклика корпуса трансформатора на динамическое воздействие. К таким задачам относится задача моделирования процесса разрушения трансформатора при возникновении в его конструкции короткого замыкания. Моделирование проводилось для двух типов трансформаторов: трансформатора мощности и трансформатора тока. Несмотря на то, что конструктивно корпуса этих трансформаторов отличаются друг от друга, методика моделирования процессов изменения НДС и разрушения для них общая. Этапы расчета представлены на рис. 7.18.

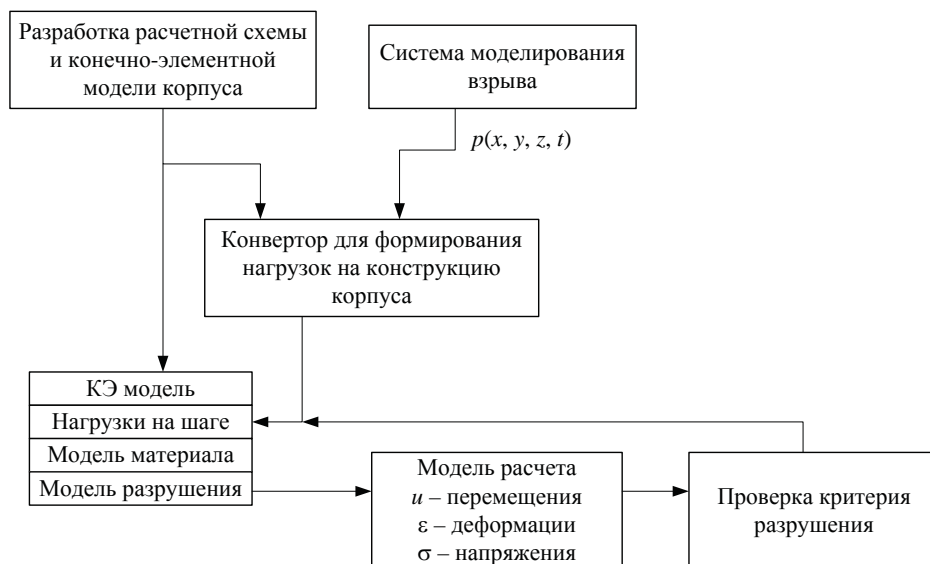


Рис. 7.18. Блок-схема расчета кинетики НДС

Способ реализации представленного на рис. 7.17 алгоритма определяется расчетным модулем, в соответствии с требованиями которого формиру-

ются конечно-элементная модель, векторы нагрузок, граничные условия и т.п.

В связи с тем, что программа LS-DYNA, по сути, является только расчетной системой, в которой модули подготовки данных и анализа результатов расчета (препроцессор и постпроцессор) развиты слабо, то подготовка исходных данных, в частности, построение модели и задание граничных условий, и анализ полученных результатов целесообразно проводить в системах с более развитыми модулями препроцессора и постпроцессора. Примером такой системы является программный комплекс ANSYS, в который программа LS-DYNA входит как дополнительный расчетный модуль.

Программный комплекс ANSYS является системой численного моделирования так называемого «тяжелого» класса и предназначен для расчета процессов из различных областей физики на основе универсального метода конечных элементов в двумерной и трехмерной постановках. Реализована большая библиотека конечных элементов с широкими расчетными возможностями. Комплекс имеет развитые препроцессор с возможностью импорта файлов в форматах большинства систем объемного моделирования и постпроцессор.

Поэтому конечно-элементные модели корпусов трансформаторов (рис. 7.18) создавались в препроцессоре комплекса ANSYS.

Давление на стенки корпуса рассчитывались в комплексе моделирования поведения масла в условиях высоковольтного разряда, которая использует метод конечных объемов. Для преобразования этих давлений в формат конечно-элементной модели комплекса ANSYS создан специальный конвектор.

7.5.2. Создание расчетной модели

В препроцессоре на основе трехмерной твердотельной модели трансформатора создается расчетная модель (рис. 7.2), в которую входят только детали основного корпуса, ограничивающие масляную полость трансформатора, и усиливающие их элементы. При этом необходимо следить, чтобы нормали поверхностей, ограничивающие масляную полость трансформатора, и построенных на них элементов, к которым предполагается задавать давление, были направлены вовнутрь полости (рис. 7.3). Это необходимо, чтобы обеспечить в расчете правильный знак приложенного давления.

На основе этой модели создается сетка конечных элементов, состоящая из оболочечных элементов, толщины которых соответствуют толщинам стенок корпуса. На рис. 7.4 представлены такие конечно-элементные модели, на которых разными цветами показаны области с различными заданными толщинами.

Конечно-элементная модель трансформатора мощности состоит из $N_p = 183\,455$ узлов и $N_e = 170\,874$ оболочечных конечных элементов. Число уравнений составляет $N_{eq} = 1\,100\,730$. Для трансформатора тока $N_p = 81\,351$, $N_e = 72\,792$ и $N_{eq} = 488\,106$.

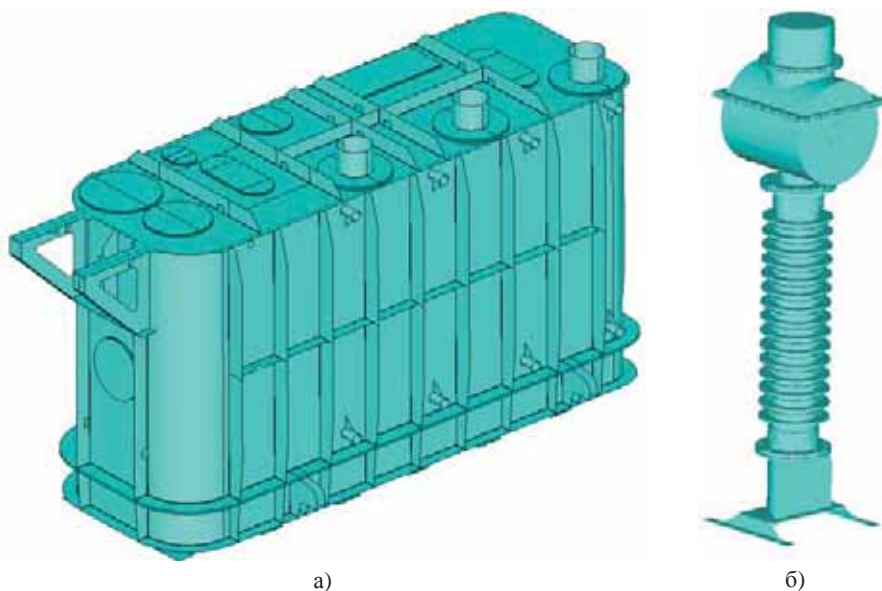


Рис. 7.18. Трехмерные модели трансформаторов: а) трансформатор мощности; б) трансформатор тока

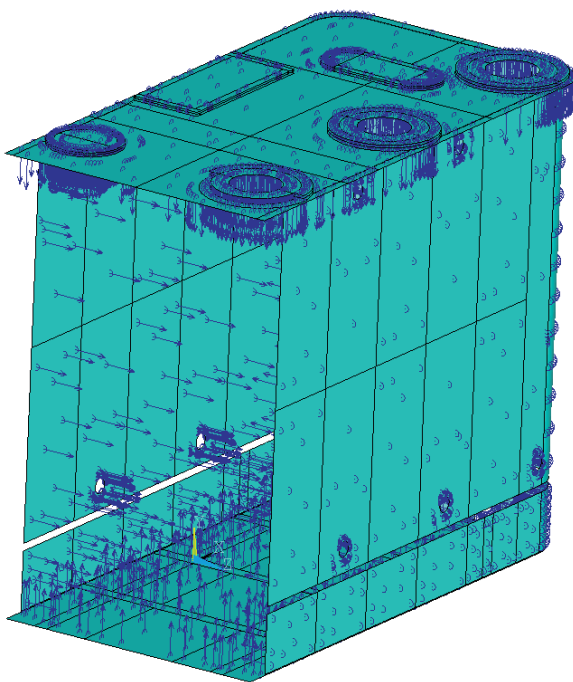


Рис. 7.19. Фрагмент модели трансформатора мощности с показанными направлениями нормалей поверхностей



Рис. 7.20. Конечно-элементные модели трансформаторов: а) трансформатор мощности; б) трансформатор тока

Соединение различных деталей между собой осуществляется специальными связями, которые предназначены для моделирования соединений различного типа и, в частности, для соединений сварных и болтовых соединений. Имеется возможность задать либо неразрушаемое соединение, либо задать уровень растягивающих и сдвиговых усилий и пластических деформаций, при которых связь разрывается. Для неразрушаемой связи два узла сетки имеют одинаковые перемещения при любых нагрузках. Разрушаемая связь прикладывается к двум узлам сетки и на нее накладывается условие разрушения связи по усилиям, которое определяется из выражения

$$\left(\frac{F_n}{[F_n]} \right)^f + \left(\frac{F_\tau}{[F_\tau]} \right)^s \geq 1,$$

где F_n и F_τ – рассчитанные приходящие на связь нормальное растягивающее и сдвиговое усилие, соответственно, при расчете; и $[F_n]$ и $[F_\tau]$ – максимальное нормальное и максимальное сдвиговое усилие связи при разрушении, соответственно; f и s – показатели степени для нормального и сдвигового усилия, соответственно. При задании нулевых значений для максимальных усилий $[F_n]$ или $[F_\tau]$ для соответствующего направления связь переводится в неразрушающую. Величины $[F_n]$ и $[F_\tau]$ определяются для каждого соединения (болтового или сварного) по известным моделям предельного состояния.

Условие разрушения связи по пластической деформации определяется из выражения $\varepsilon_p \geq [\varepsilon_p]$, где ε_p – пластическая деформация в связи, определяемая по связанным элементам; $[\varepsilon_p]$ – максимальная пластическая деформация в связи. При задании нулевого значения максимальной пластической деформации $[\varepsilon_p]$ разрушение по пластической деформации не происходит.

Таким образом, имеется возможность задать следующие варианты условий разрушения:

1. неразрушаемая связь при задании нулевых значений усилий и пластической деформации;

2. разрушении по соответствующим усилиям при задании значения максимальных усилий по заданному направлению (нормальному или сдвиговому) и нулевого значения пластической деформации;

3. разрушение по пластической деформации при задании значения максимальной пластической деформации и нулевых значений усилий;

4. разрушение по усилиям или пластической деформации при задании значений максимальных усилий и пластической деформации. В данном случае разрушение происходит по одному ранее наступившему в процессе расчета критерию.

Для оценки корректности модели и соединений деталей первоначально рекомендуется в расчетах задавать неразрушаемое соединение. При окончательном расчете следует задавать условия разрушения по усилиям, которые определяются по характеристикам соединяемых деталей (толщины и размеры элементов, характеристики болтов, свойства материалов), и пластической деформации при наличии соответствующей характеристики материала.

На рис. 7.21 показаны модели трансформаторов, на которых указаны связи.

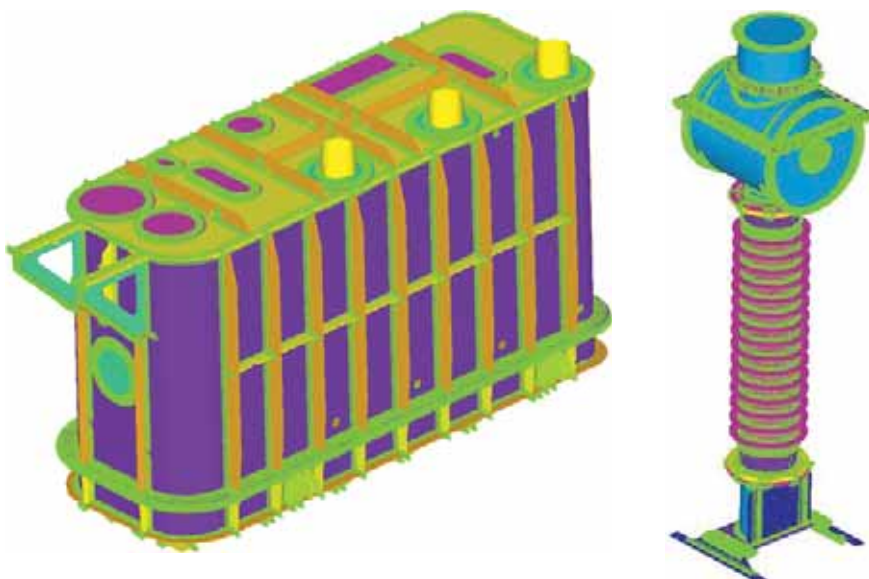


Рис. 7.21. Модели трансформатора с показанными связями: а) трансформатор мощности; б) трансформатор тока

Задание нагрузок осуществляется на набор элементов, моделирующих замкнутую полость трансформатора (рис. 7.22), в виде распределенного давления, изменяющегося по времени. Закон распределения давления по элементам стенки трансформатора и времени определяется по результатам гидродинамического расчета распространения ударных волн при коротком замыкании.

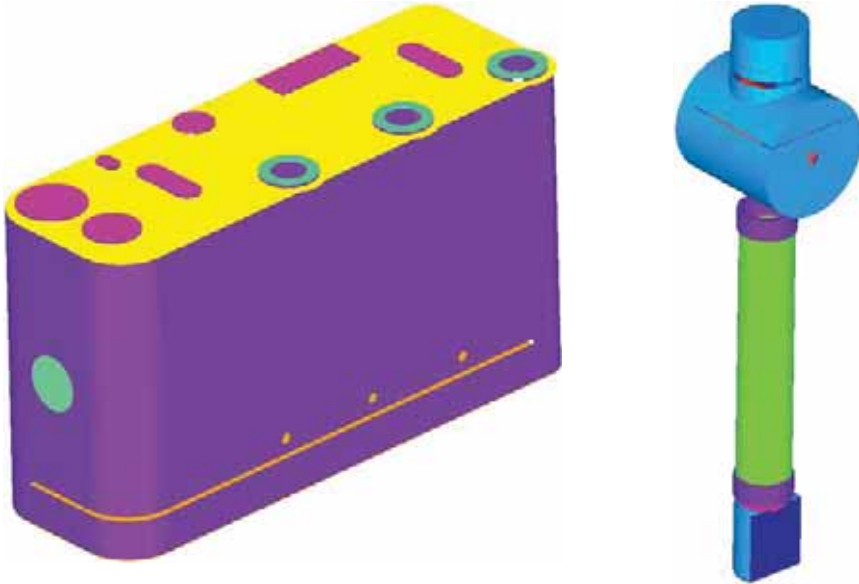


Рис. 7.22. Набор элементов для задания давления: а) трансформатор мощности; б) трансформатор тока

7.5.3. Модель материала

Так как короткое замыкание в трансформаторе приводит к динамическому воздействию на его конструкцию, приводящему к деформированию ее элементов за пределами упругости, для описания характеристик материала необходимо применять кривые деформирования, зависящие от скорости деформации. Существуют несколько различных моделей, предназначенных для описания кривых деформирования при высокоскоростном деформировании. В настоящей работе использована модель Купера-Симонда, имеющая вид

$$\sigma_{eff} = \left[1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{\frac{1}{P}} \right] (\sigma_0 + \beta E_p \epsilon_p^{eff}), \quad (7.31)$$

где σ_0 – начальный предел текучести, $\dot{\epsilon}$ – скорость деформации; C и P – параметры скорости деформации модели Купера-Симонда; ϵ_p^{eff} – интенсивность пластической деформации; E_p – модуль пластического упрочнения, определяемый из выражения

$$E_p = \frac{E_{tan} E}{E - E_{tan}},$$

где E – модуль упругости; E_{tan} – касательный модуль.

Свойства материала приведены в таблице 7.3.

Таблица 7.3. Свойства материала

Плотность, г	7830 кг/м ³
Модуль упругости, E	200 ГПа
Коэффициент Пуассона	0,3
Предел текучести, σ_0	340 МПа
Касательный модуль, E_{tan}	763 МПа
Параметр C	40
Параметр P	5
Максимальная пластическая деформация	0,25

Кривые деформирования, рассчитанные по зависимости (1) для различных скоростей деформации (с шагом 10 сек⁻¹), показаны на рис. 7.23.

В процессе расчета для каждого шага по времени в каждой точке корпуса определялись скорость деформации и положение эквивалентных напряжений на соответствующей кривой деформирования.

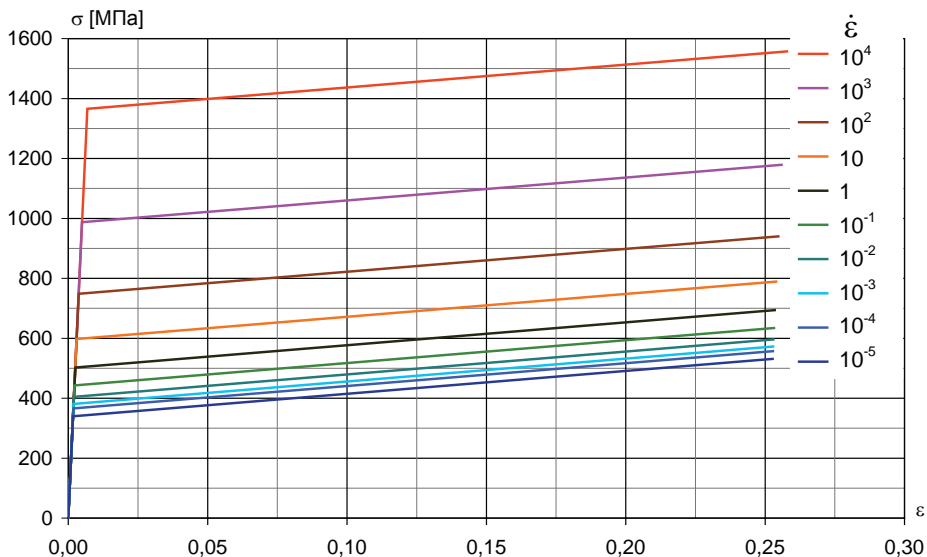


Рис. 7.23. Кривые деформирования материала в зависимости от скорости деформации

7.5.4. Алгоритм анализа быстропротекающих процессов деформирования

Уравнение, описывающие нестационарные динамические процессы для упругопластических тел имеют следующий вид:

$$[M(u)]\{\ddot{u}\} + [C(u)]\{\dot{u}\} + \{F^{int}(u)\} = \{F^{ext}(u)\}, \quad (7.32)$$

где $[M(u)]$ и $[C(u)]$ – зависящие от текущей конфигурации матрица масс и матрица демпфирования конструкции, соответственно; $\{F^{int}(u)\}$ – зависящий

от истории процесса деформирования вектор внутренних сил; $\{F^{ext}(u)\}$ – вектор внешних сил; $\{\ddot{u}\}$ – вектор ускорений точек конструкции; $\{\dot{u}\}$ – вектор скоростей точек конструкции; $\{u\}$ – вектор перемещений точек конструкции.

Для интегрирования уравнения (2) можно использовать как явную, так и неявную схемы интегрирования. При применении неявной схемы расчета переходных процессов в линейных задачах, когда матрица жесткости линейна, и шаги по времени большие, решение всегда устойчиво. Для нелинейных задач с мягкой характеристикой требуется обратимость матрицы жесткости и уменьшение шага по времени для лучшей сходимости, которая, тем не менее, не гарантируется при большой нелинейности задачи.

При больших перемещениях точек конструкции изменяются размеры элементов, что может приводить к изменению компонент матрицы масс элементов. Это особенно важно для оболочечных конечных элементов, в матрицу масс которых входят моменты инерции.

Зависимость матрицы $[C]$ от вектора скоростей $\{\dot{u}\}$ и вектора $\{F^{int}(u)\}$ от вектора перемещений $\{u\}$ определяются принятой моделью неупругого поведения материала. Наиболее часто применяются модели, основанные на уравнениях состояния, которые связывают приращения напряжений с приращениями деформаций – модели типа «течения».

Наиболее просто применить модели пластического течения, если использовать явную схему интегрирования, реализованной в модуле LS-DYNA.

Вектор ускорений в момент времени t определяется как

$$\{\ddot{u}_t\} = [M]^{-1} (\{F_t^{ext}\} - \{F_t^{int}\} - [C(u)]\{\dot{u}\}), \quad (7.33)$$

где $\{F_t^{ext}\}$ – вектор приложенных внешних и объемных сил; $\{F_t^{int}\}$ – вектор внутренних сил, который определяется как

$$F^{int} = \sum_e \left(\int_{\Omega_e} [B]^T \{\sigma_n\} d\Omega + F_e^{hg} + F_e^{cont} \right).$$

Здесь $[B]$ – матрица, связывающая перемещения с деформациями, T – знак транспонирования, $\{\sigma_n\}$ – вектор напряжений в элементе, F_e^{hg} – сила сопротивления хрупкому разрушению элемента, F_e^{cont} – контактные усилия в элементе.

Затем определяются векторы скоростей и перемещений как

$$\begin{aligned} \{\dot{u}_{t+\Delta t}\} &= \{\dot{u}_{t-\Delta t}\} + \{\ddot{u}_t\} \Delta t, \\ \{u_{t+\Delta t/2}\} &= \{u_t\} + \{\dot{u}_{t+\Delta t/2}\} \Delta t_{t+\Delta t/2}, \end{aligned}$$

где

$$\Delta t_{t+\Delta t/2} = 0.5(\Delta t_t + \Delta t_{t+\Delta t})$$

и

$$\Delta t_{t-\Delta t/2} = 0.5(\Delta t_t - \Delta t_{t+\Delta t}).$$

Координаты узлов в новом положении для момента времени $t + \Delta t$ изменяются прибавлением приращения перемещений к начальной геометрии $\{x_0\}$

$$\{x_{t+\Delta t}\} = \{x_0\} + \{u_{t+\Delta t}\}.$$

Напряженное состояние в каждом элементе определяется по зависимости

$$\{\sigma_e\}_{t+\Delta t} = \{\sigma_e\}_t + \{\Delta\sigma_e\}_{\Delta t}.$$

Приращение напряжений $\{\Delta\sigma_e\}_{\Delta t}$ на каждом шаге определяются по зависимости

$$\{\Delta\sigma_e\}_{\Delta t} = [D_\tau] (\{\Delta\varepsilon\}_{\Delta t} - \{\Delta\varepsilon_\theta\}_{\Delta t}),$$

где $[D_\tau]$ – матрица связи приращений напряжений и приращений деформаций, определяемая выбранной моделью теории течения, $\{\Delta\varepsilon\}_{\Delta t} = [B]_e \{\Delta u_e\}_{\Delta t}$ – приращение деформаций в элементе, $\{\Delta\varepsilon_\theta\}_{\Delta t}$ – приращение деформаций, вызванных изменением температуры в элементе, $\{\Delta u_e\}_{\Delta t}$ – вектор приращений перемещений узлов элемента.

При решении нелинейных задач:

1. требуется создание расчетной схемы, обеспечивающей обратимость матрицы сосредоточенных масс;
2. уравнения становятся несвязанными и могут быть решены напрямую (явно);
3. не требуется построения и обращения матрицы жесткости. Все нелинейности, включая контакт, входят в вектор внутренних сил;
4. главные вычислительные затраты приходятся на определение внутренних сил;
5. не требуется контроля сходимости, так как уравнения не связаны;
6. требуются очень маленькие шаги по времени для обеспечения устойчивости счета.

Явная схема решения устойчива, если только шаг по времени меньше критического шага Δt^{crit} :

$$\Delta t \leq \Delta t^{crit} = \frac{2}{\omega_{max}},$$

где ω_{max} – наибольшая собственная частота.

Размер критического временного шага определяется по критерию Куранта-Фридрихса-Леви следующим образом.

Собственная частота определяется как

$$\omega_{max} = 2 \frac{c}{l},$$

где c – скорость распространения волны и определяется из выражения

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}},$$

l – характерный размер элемента.

Подстановка ω_{max} в уравнение для размера критического временного шага дает

$$\Delta t = \frac{l}{c}.$$

Таким образом, Δt есть время, необходимое для прохождения волны через элемент длиной l , то есть размер критического шага по времени для явной схемы интегрирования зависит от размеров элементов и свойств материала (скорости звука).

Система LS-DYNA проверяет все элементы и затем вычисляет необходимый шаг по времени. Для увеличения устойчивости расчета используется коэффициент 0.9 для уменьшения шага по времени

$$\Delta t = 0.9 \frac{l}{c}.$$

Для четырехугольных оболочечных конечных элементов характерная длина определяется как

$$l = \frac{S}{\max(l_1, l_2, l_3, l_4)},$$

где S – площадь элемента, l_1, l_2, l_3, l_4 – характерные размеры.

Для треугольных оболочечных конечных элементов

$$l = \frac{2S}{\max(l_1, l_2, l_3)}.$$

Для всех типов оболочечных конечных элементов

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\mu^2)}}.$$

Из-за очень малого размера шага по времени явная схема пригодна только для очень быстрых переходных процессов, к которым относится рассматриваемая проблема.

7.5.5. Пример расчета ударного воздействия

Для отработки методики были рассмотрены модельные задачи расчета ударного воздействия на корпус трансформатора мощности (рис. 7.24а). Ударное воздействие моделировало взрыв в центре корпуса с помощью средств программы LS-DYNA. Для каждого варианта расчета все связи имели заданный уровень усилий разрушения. Скорость деформирования определялась в процессе расчета в зависимости от изменения давления на стенках корпуса.

В первом варианте все детали были соединены неразрывной связью. Во втором варианте все связи имели одинаковый уровень усилий разрушения. В третьем варианте связи имели различный уровень усилий разрушения. В частности, крышки на верхней поверхности и боковых стенках имели более низкий уровень усилий разрушения.

На рис. 7.24–7.29 показаны распределение суммарных перемещений деталей, интенсивности напряжений по Мизесу и интенсивности пластических деформаций, соответственно, в различные моменты времени для описанных вариантов расчета.

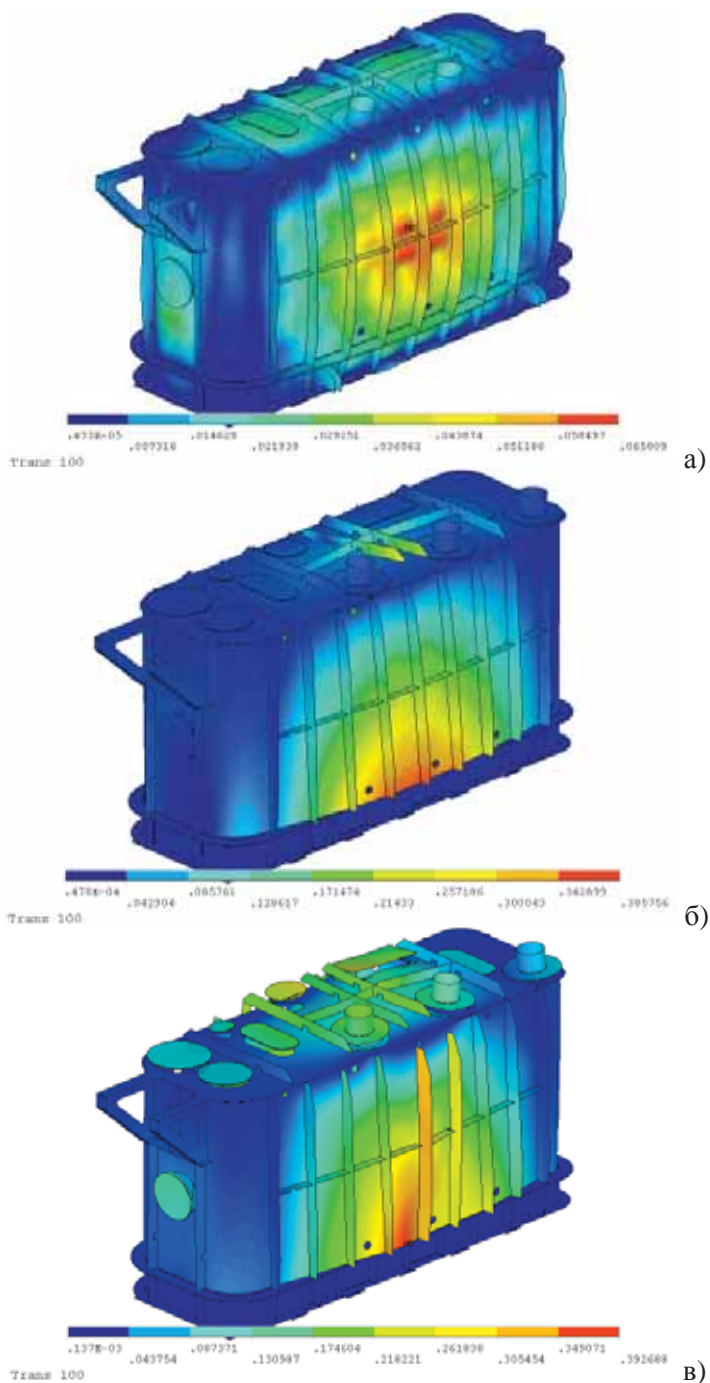


Рис. 7.24. Распределение суммарных перемещений (мм) в момент времени $t = 0.025$ сек для различных вариантов расчета: а) вариант 1; б) вариант 2; в) вариант 3

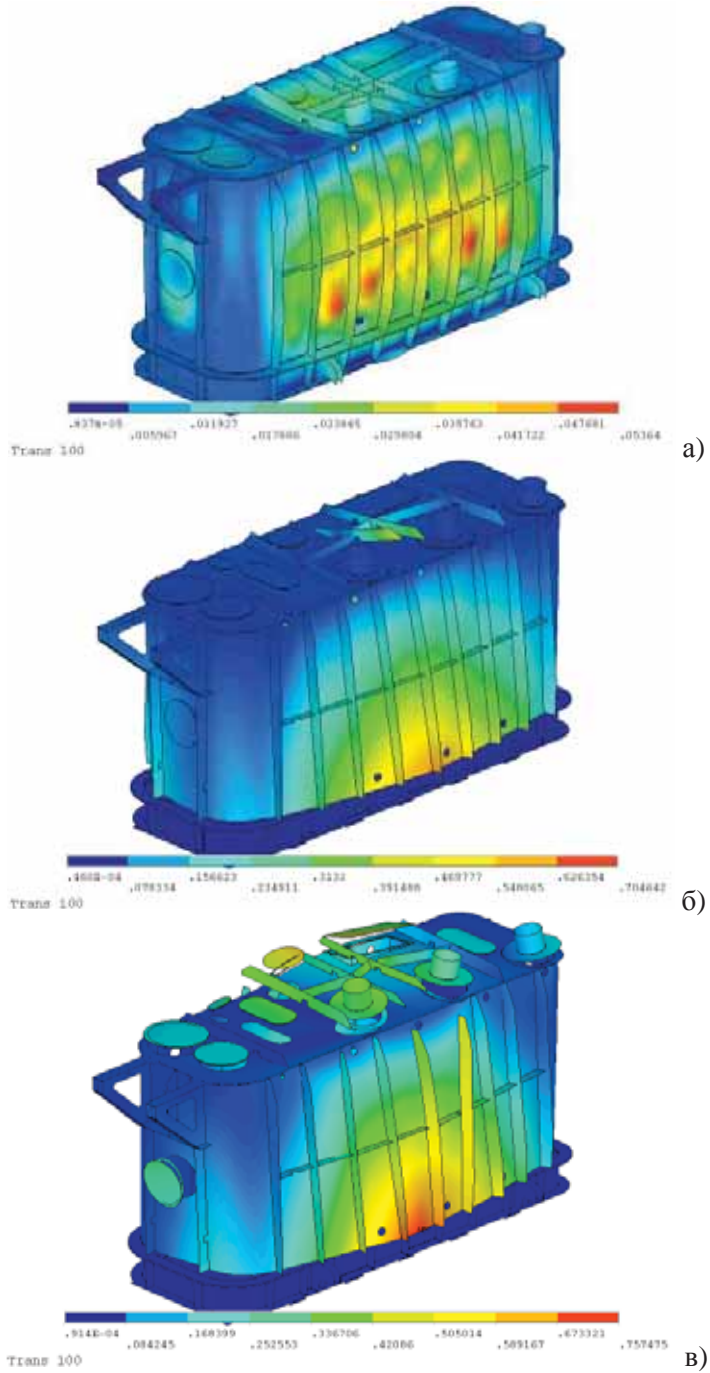


Рис. 7.25. Распределение суммарных перемещений (мм) в момент времени $t = 0.05$ сек для различных вариантов расчета: а) вариант 1; б) вариант 2; в) вариант 3

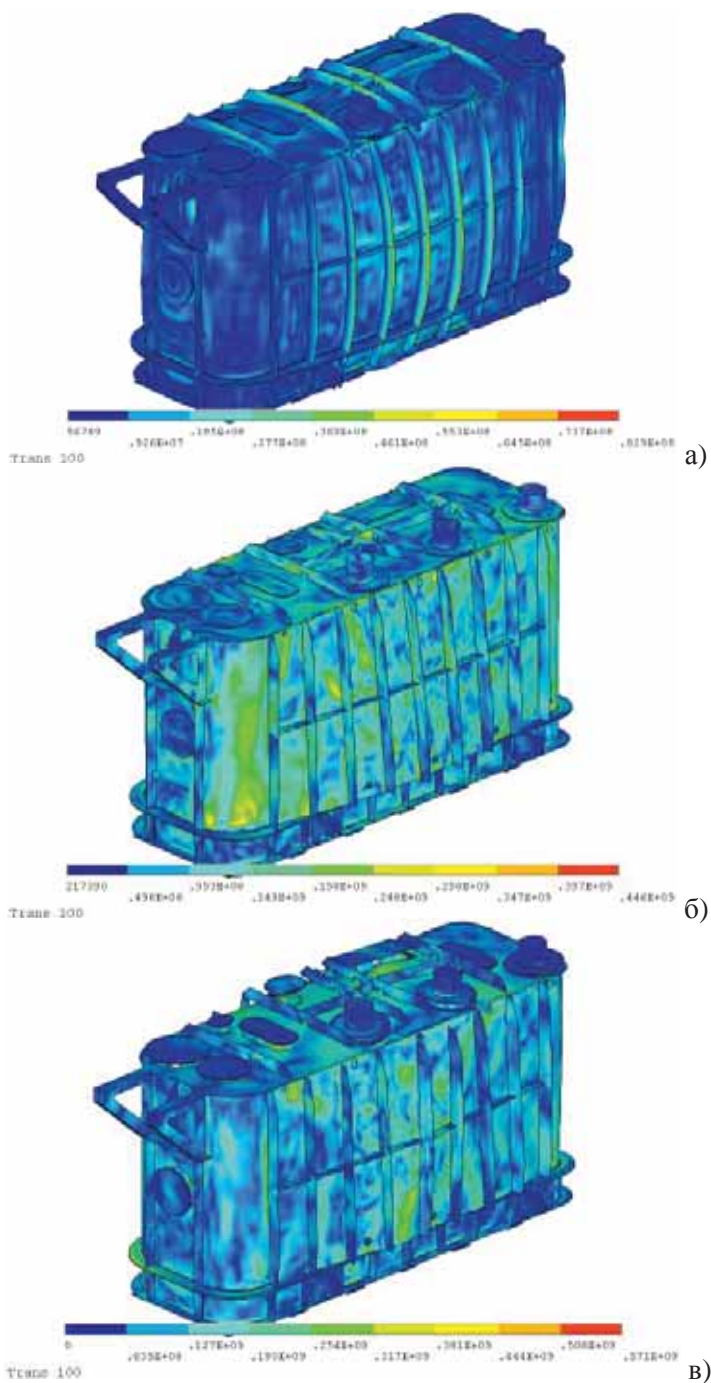


Рис. 7.26. Распределение интенсивности напряжений по Мизесу (Па) в момент времени $t = 0.025$ сек для различных вариантов расчета: а) вариант 1; б) вариант 2; в) вариант 3

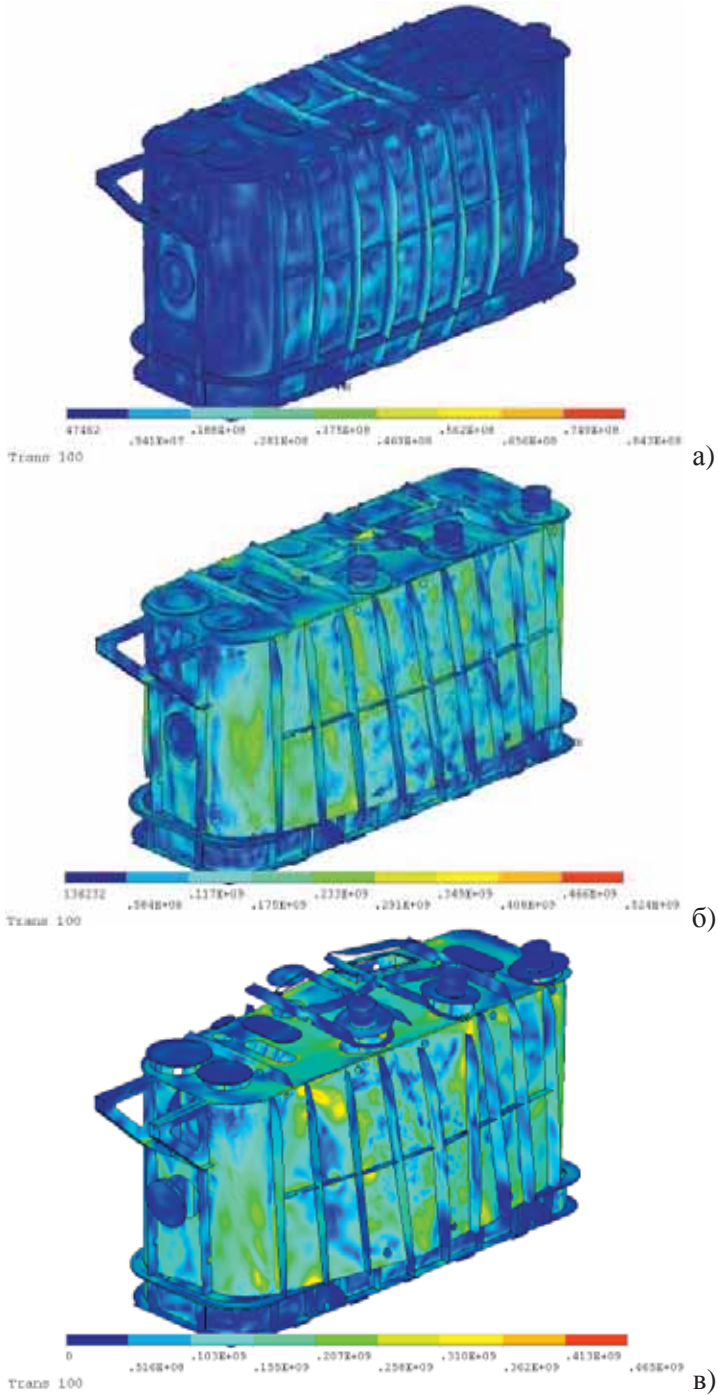


Рис. 7.27. Распределение интенсивности напряжений по Мизесу (Па) в момент времени $t = 0.05$ сек для различных вариантов расчета: а) вариант 1; б) вариант 2; в) вариант 3

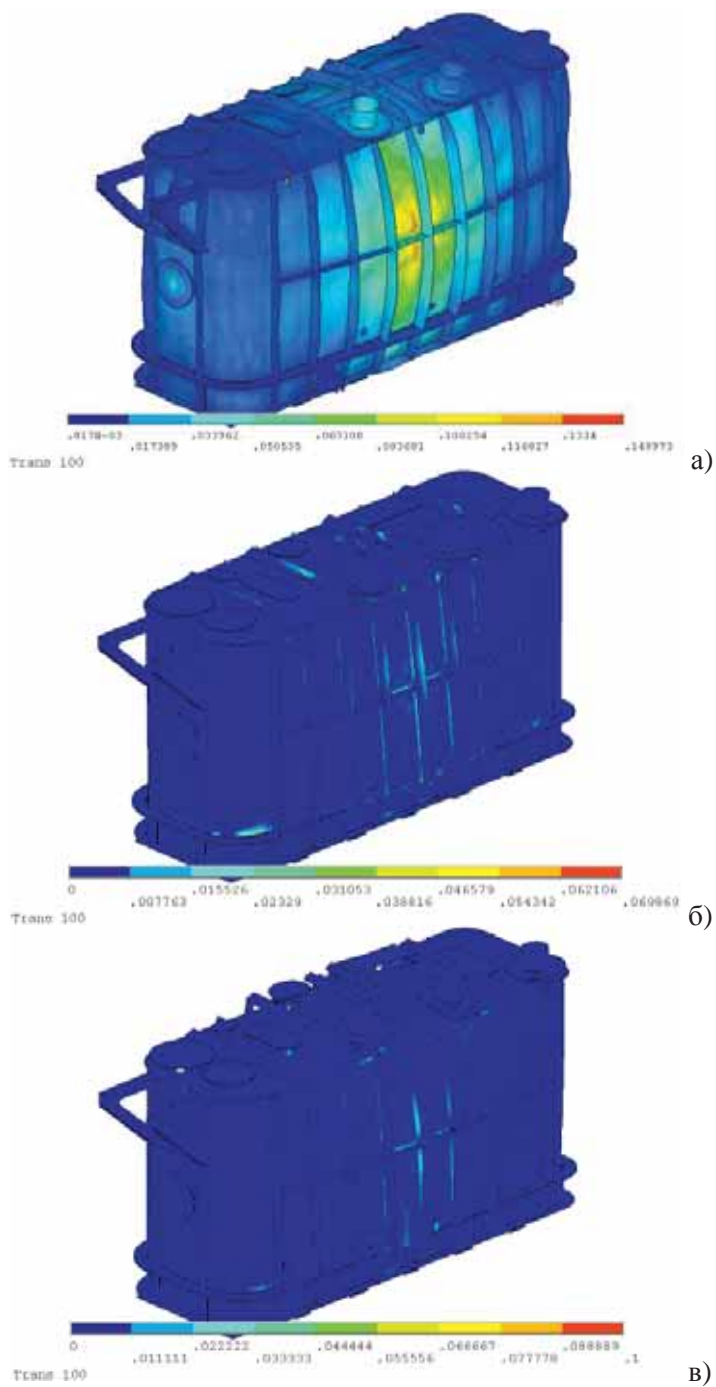


Рис. 7.28. Распределение интенсивности пластических деформаций в момент времени $t = 0.025$ сек для различных вариантов расчета: а) вариант 1; б) вариант 2; в) вариант 3

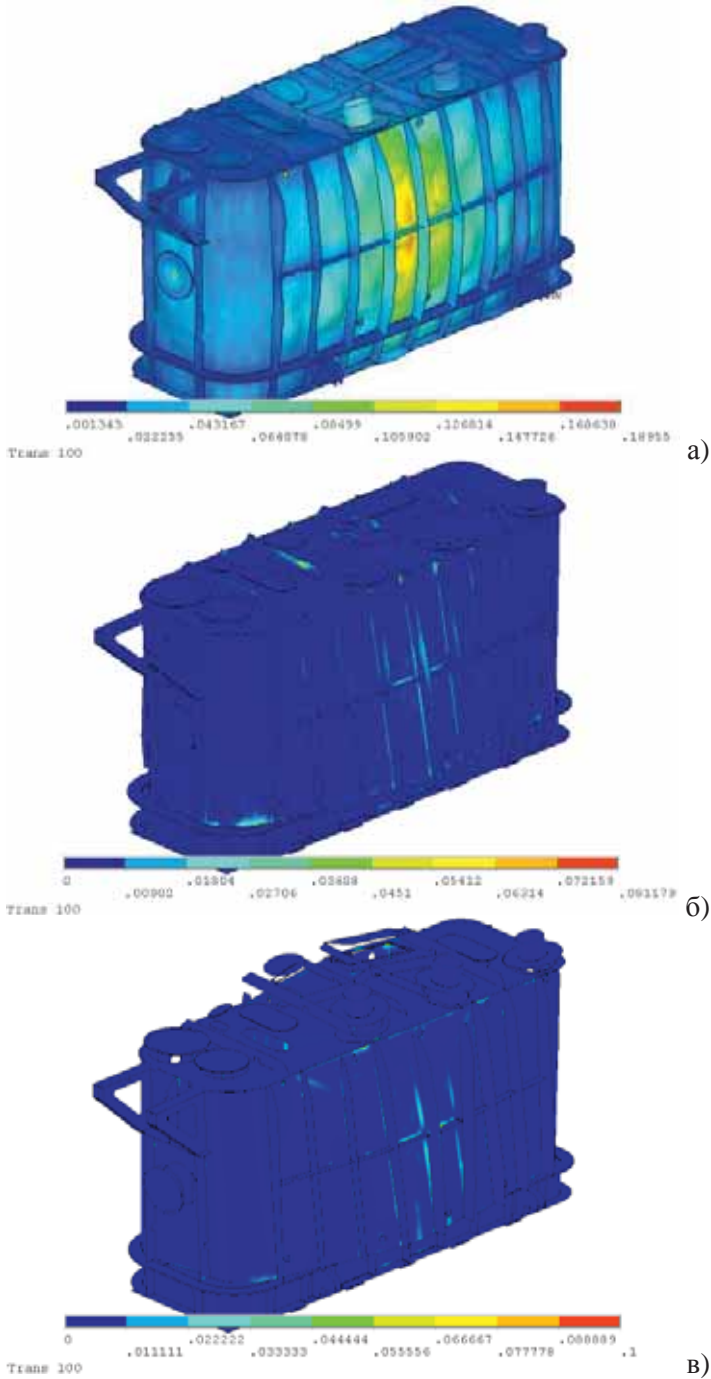


Рис. 7.29. Распределение интенсивности пластических деформаций в момент времени $t = 0.05$ сек для различных вариантов расчета: а) вариант 1; б) вариант 2; в) вариант 3

Представленные на рис. 7.24 – 7.29 результаты расчета показывают, что учет связей в соединениях существенно влияет на поведение модели. Так в первом варианте корпус не разрушается, так как максимальные эквивалентные напряжения (рис. 7.24а и 7.25а) не превосходят предела текучести, а соответствующие им максимальные деформации (рис. 7.27а и 7.28а) – величины максимальных пластических деформаций. Характер деформирования корпуса в моменты времени $t = 0.025$ сек и $t = 0.05$ сек показывают, что стенка трансформатора колеблется. При этом максимальные пластические деформации возрастают.

Во втором и третьем вариантах расчета получено, что максимальные усилия, разрывающие сварные соединения, возникают в нижней части корпуса, и происходит отрыв вертикальной стенки от основания. Также происходит разрушение сварных соединений вертикальных ребер жесткости. Это приводит при дальнейшем снижении жесткости конструкции к более высоким уровням действующих напряжений и остаточных деформаций. В третьем варианте происходит отрыв крышек, разрушение вертикальных ребер на поверхности корпуса и мест соединения стенок и основания трансформатора. Таким образом наиболее слабым звеном в трансформаторе являются сварные и болтовые соединения.

8.5.6. Ударное воздействие при коротком замыкании

Моделирование заданного воздействия при коротком замыкании производилось для трансформаторов мощности и тока.

При моделировании трансформатора мощности была использована модель, соответствующая третьему варианту из предыдущего параграфа. Свойства материала определялись по зависимости (1).

Основным отличием являлось то, что при коротком замыкании скорость приложения давления к стенкам корпуса трансформатора ниже, чем при моделировании взрыва.

На рис. 7.30 показано изменение давления в характерных точках А, В и С корпуса трансформатора тока.

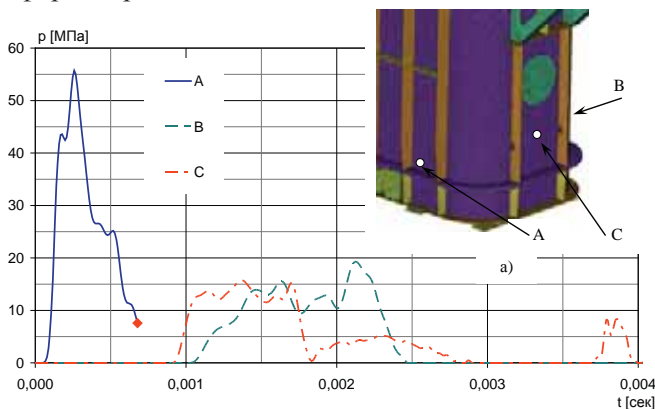


Рис. 7.30. Изменение давления в характерных точках конструкции трансформатора мощности в зависимости от времени: а) положение точек А, В и С. Здесь и далее символом \blacklozenge обозначен момент начала разрушения

Давление было определено расчетным путем по методике, изложенной выше. По результатам, представленным на рис. 7.30, можно сделать вывод о том, что максимальное давление ~ 55 МПа в точке А возникает через 0,00025

сек после короткого замыкания. Давление действует на стенки корпуса с определенной задержкой в точках В и С. При этом максимальные величины давлений в этих точках в три раза меньше, чем в точке А. Это приводит к тому, что разрушение развивается вблизи точки А.

На рис. 7.31 показаны графики изменения давления p и эквивалентного напряжения в точке А в зависимости от времени от момента короткого замыкания до момента выполнения условия разрушения.

Момент разрушения определялся при достижении эквивалентной пластической деформации предельного значения $\epsilon_{pl\max} = 0,25$ (рис. 7.34). Резкий рост напряжений в точке А связан с особенностями высокоскоростного деформирования. Скорость деформирования в точке А показана на рис. 7.31. Для сравнения на рис. 7.34 приведены скорости деформирования в точках В и С.

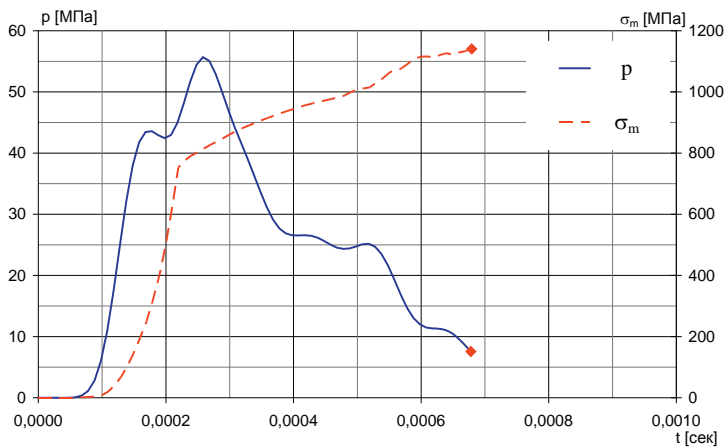


Рис. 7.31. Изменение давлений и напряжений в точке А корпуса трансформатора мощности в зависимости от времени

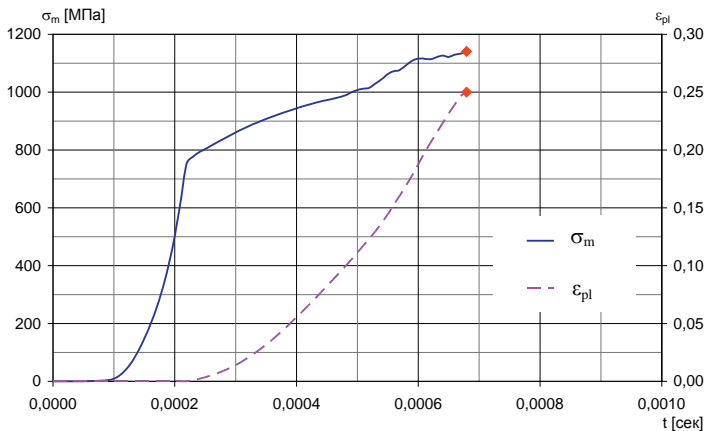


Рис. 7.32. Изменение напряжений и пластической деформации в точке А корпуса трансформатора мощности в зависимости от времени

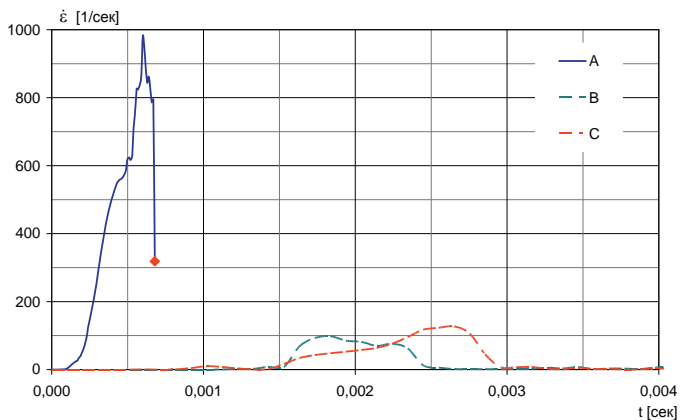


Рис. 7.33. Изменение скорости деформирования в точках А, В, и С корпуса трансформатора мощности в зависимости от времени

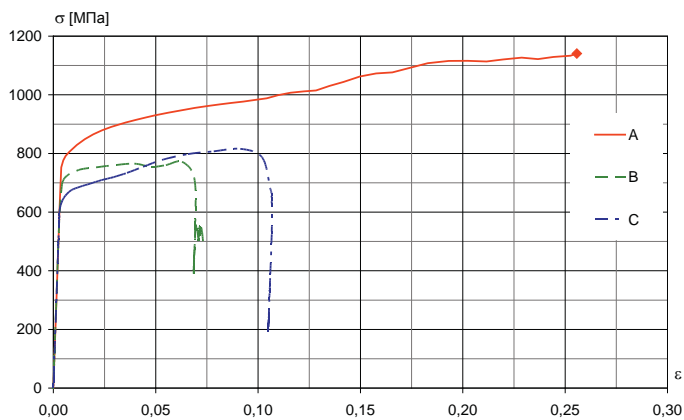


Рис. 7.34. Динамические кривые деформирования для точек А, В, и С корпуса трансформатора мощности

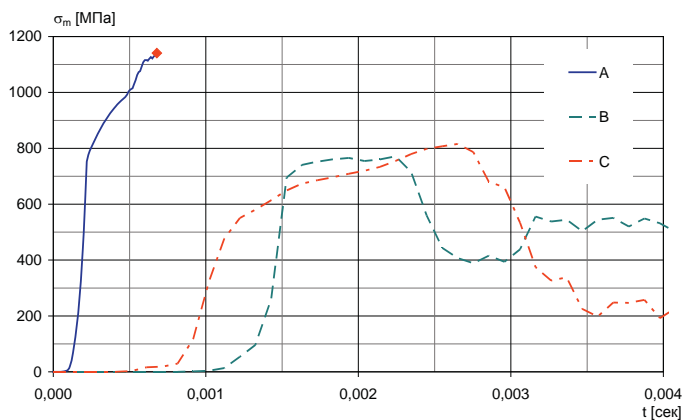


Рис. 7.35. Изменение напряжений в точках А, В, и С корпуса трансформатора мощности в зависимости от времени

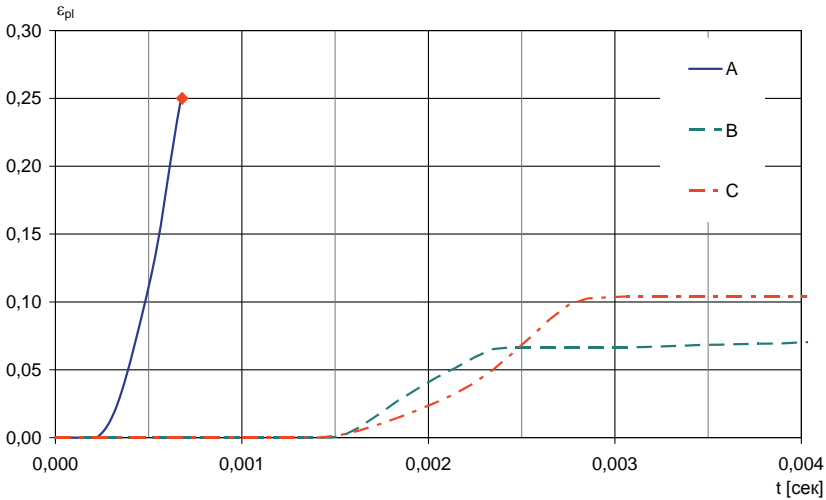


Рис. 7.36. Изменение пластической деформации в точках А, В, и С корпуса трансформатора мощности в зависимости от времени

Отличие в скоростях деформирования и условиях приложенных давлений приводит к различию в уровнях деформаций и характере изменения напряжений в точках А, В и С (рис. 7.36). На рис. 7.37 показаны динамические кривые деформирования материала корпуса в точках А, В и С. На рис. 7.38 – характер изменения по времени напряжений, а на рис. 7.35 – характер изменения по времени пластических деформаций. Нетрудно видеть, что предельные деформации возникают в точке А. Таким образом разрушается корпус вблизи точки А, как это показано на рис. 7.21–7.23.

На рис. 7.21–7.23 показаны распределение суммарных перемещений, интенсивности напряжений по Мизесу и интенсивности пластических деформаций в корпусе трансформатора мощности в различные моменты времени, соответственно.

Как видно из представленных рисунков, происходит разрыв корпуса в зоне взрыва за счет отрыва панели вертикальной стенки у дна корпуса.

Аналогичные результаты получены при моделировании ударного взаимодействия после короткого замыкания в корпусе трансформатора тока (рис. 7.26).

На рис. 7.24 показан график изменения величины давления в характерных точках корпуса трансформатора тока (рис. 7.24а). Различные условия приложенных давлений приводят к различию в скоростях деформирования и, соответственно, уровнях деформаций и характере изменения напряжений в характерных точках корпуса трансформатора тока (рис. 7.25–7.28).

На рис. 7.25 и 7.26 показаны характер изменения по времени напряжений и пластических деформаций в характерных точках корпуса трансформатора тока. Приведенный характер изменения напряжений и пластических деформаций является следствием высокоскоростного деформирования (рис. 7.27), приводящих к динамическому изменению кривых деформирования материала корпуса трансформатора тока (рис. 7.28).

Не трудно видеть, что предельные деформации возникают в точке D.

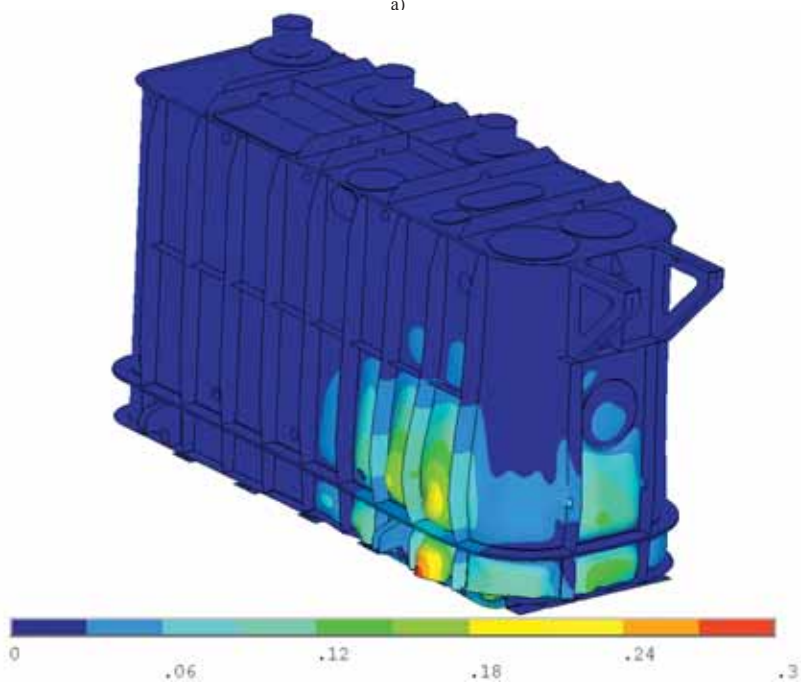
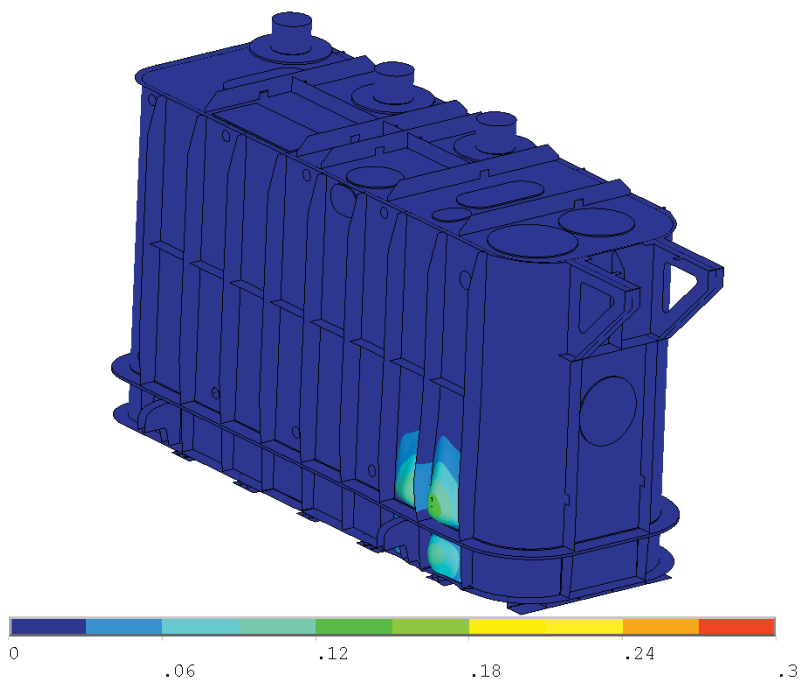
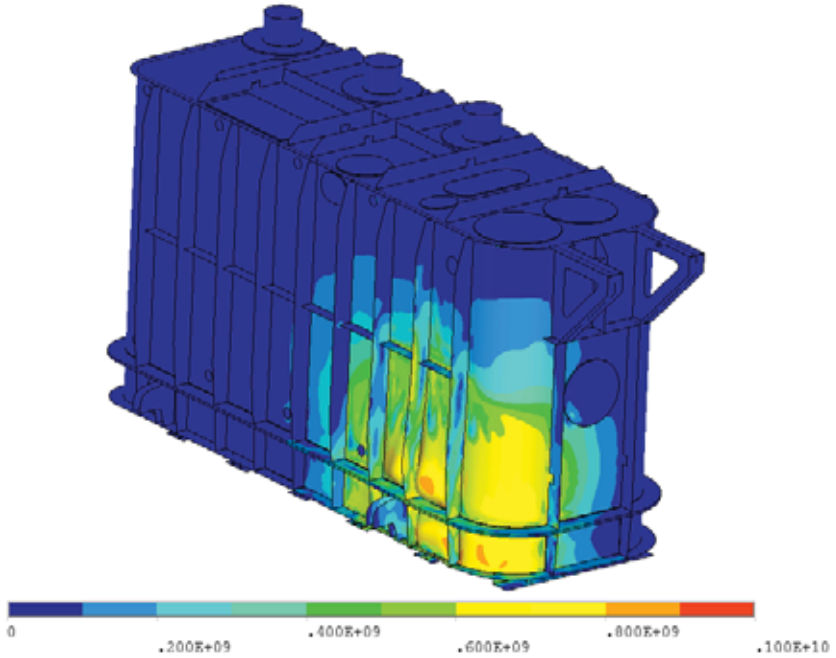
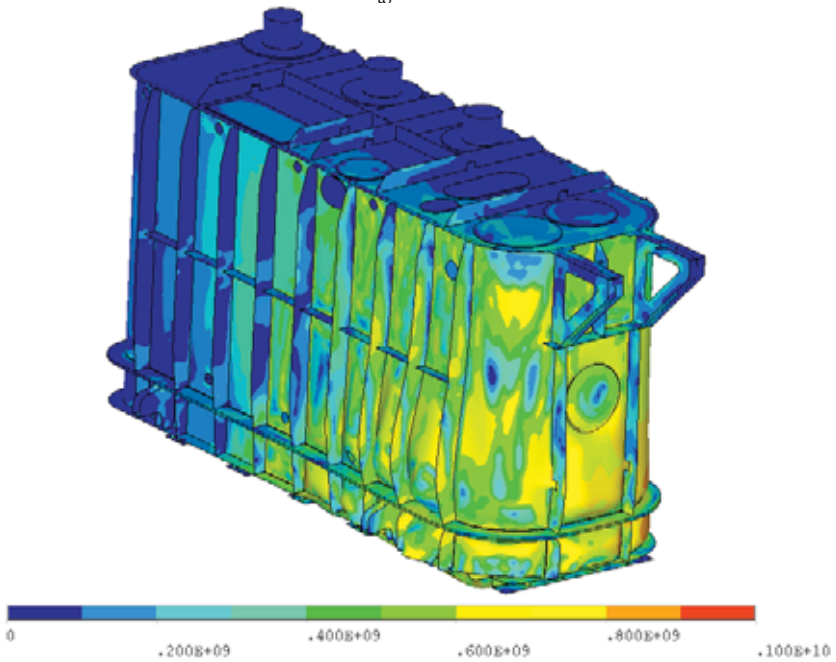


Рис. 7.37. Распределение суммарных перемещений корпуса трансформатора мощности
в различные моменты времени: а) 0.001 сек; б) 0.002 сек

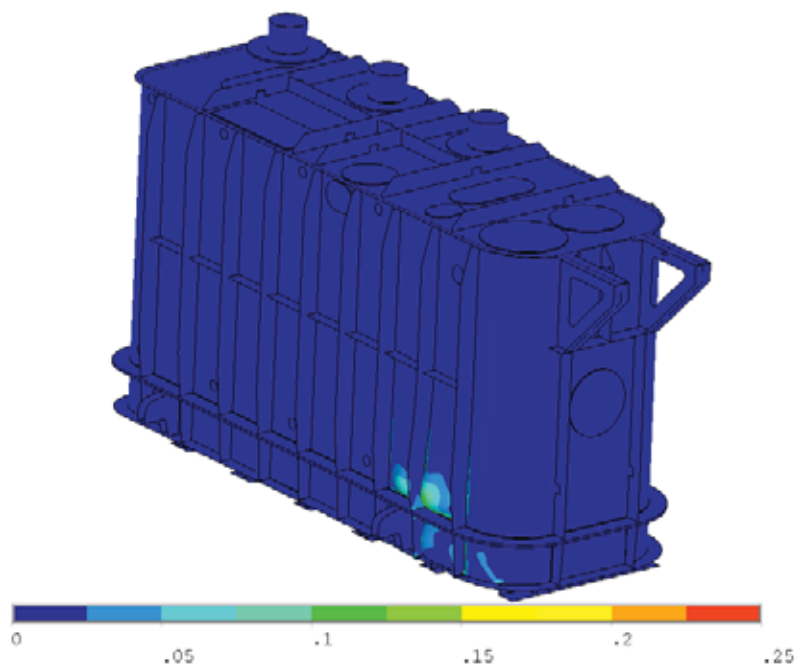


а)

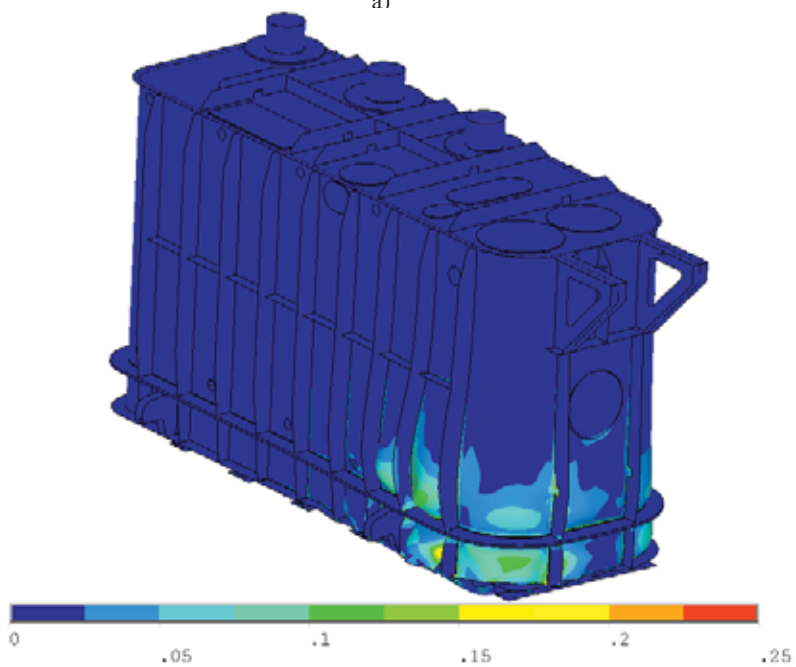


б)

Рис. 7.38. Распределение интенсивности напряжений по Мизесу в корпусе трансформатора мощности в различные моменты времени: а) 0.001 сек; б) 0.002 сек



а)



б)

Рис. 7.39. Распределение интенсивности пластических деформаций в корпусе трансформатора мощности в различные моменты времени: а) 0.001 сек; б) 0.002 сек

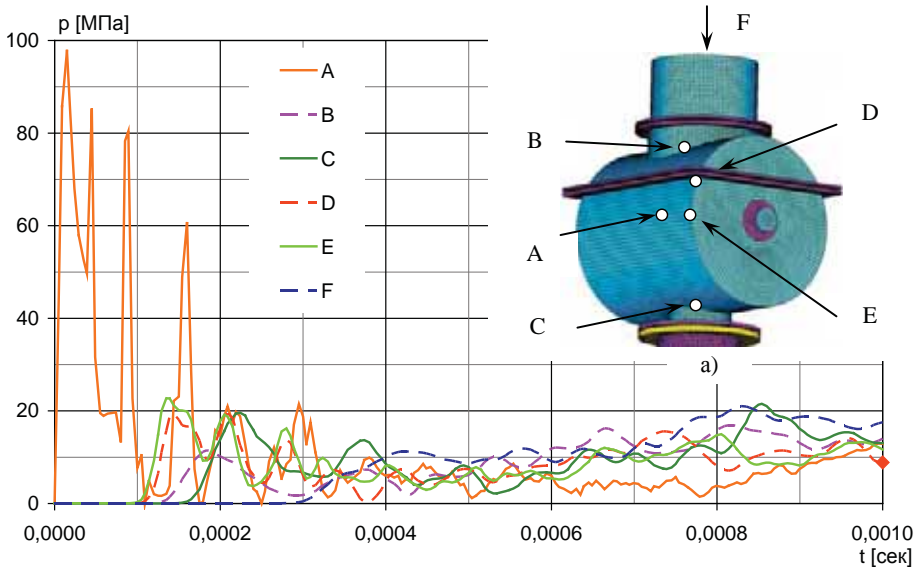


Рис. 7.40. Изменение давления в характерных точках конструкции трансформатора тока в зависимости от времени: а) положение точек А, В, С, D, Е и F

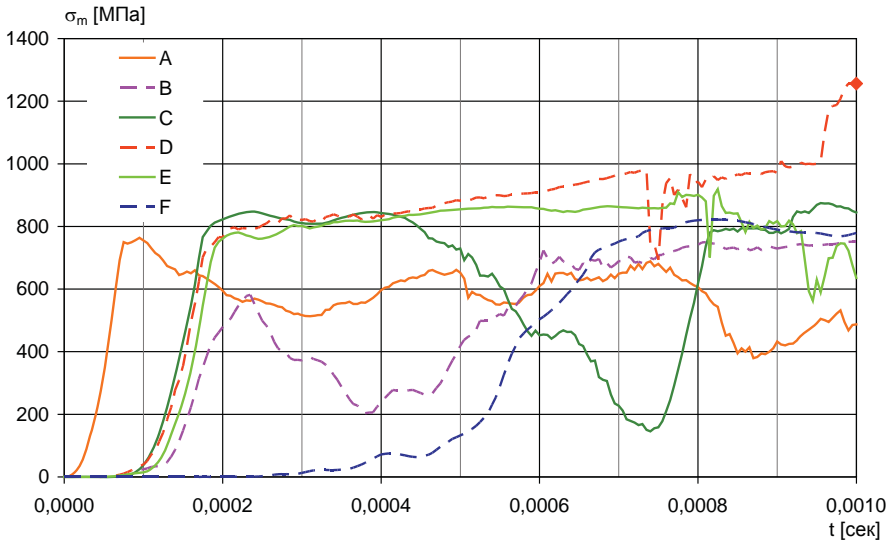


Рис. 7.41. Изменение напряжений в характерных точках корпуса трансформатора тока в зависимости от времени

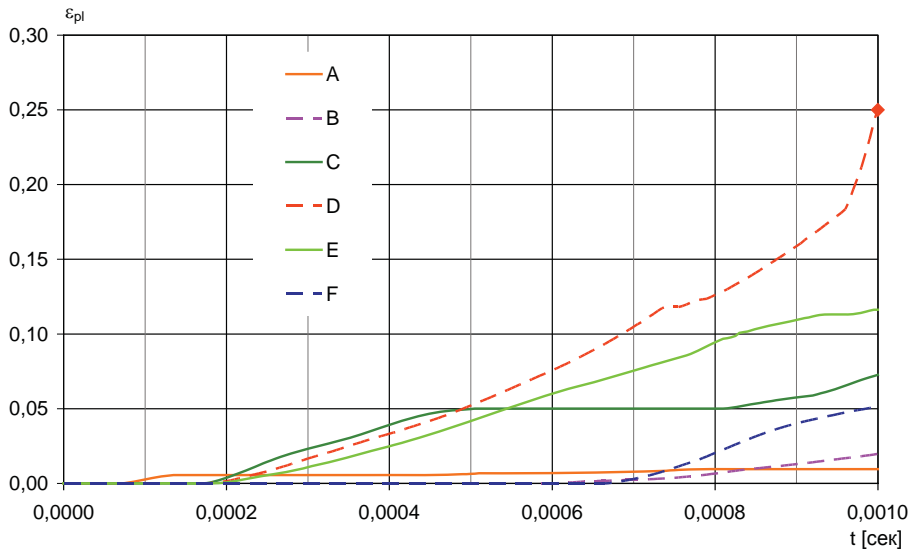


Рис. 7.42. Изменение пластической деформации в характерных точках корпуса трансформатора тока в зависимости от времени

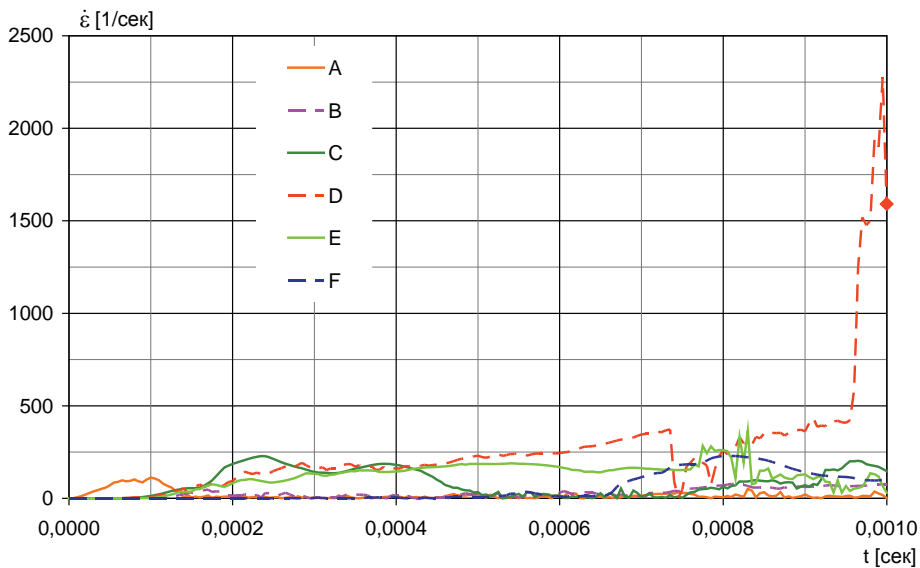


Рис. 7.43. Изменение скорости деформирования в характерных точках корпуса трансформатора тока в зависимости от времени

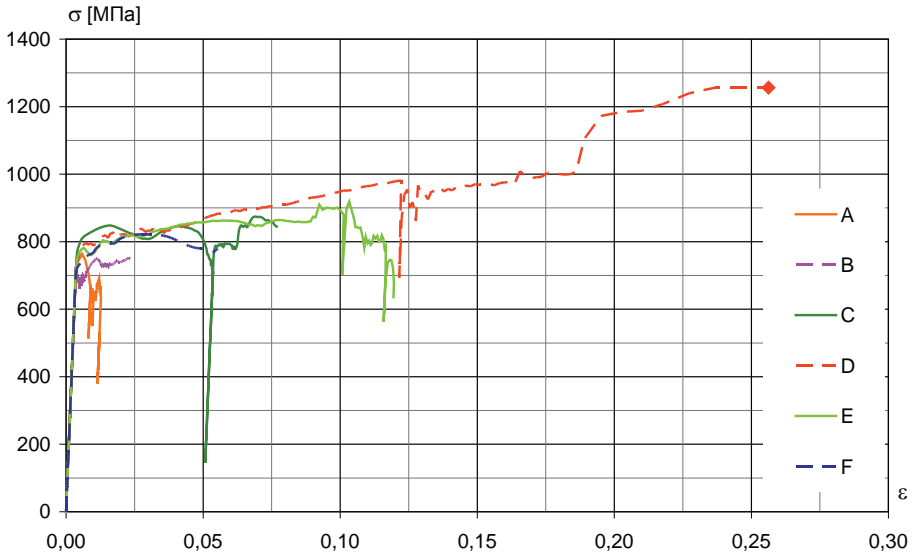


Рис. 7.44. Динамические кривые деформирования для характерных точек корпуса трансформатора тока

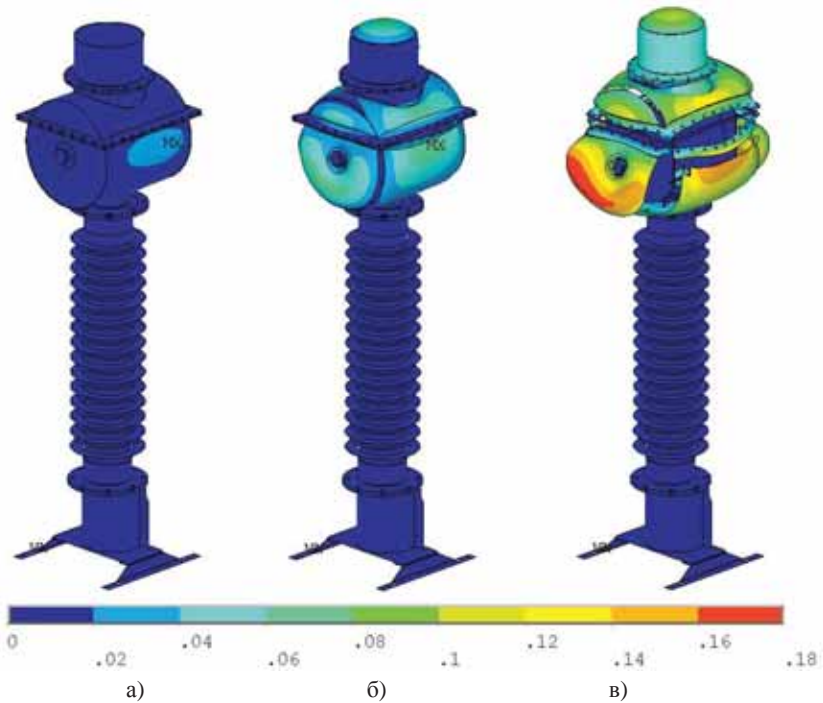


Рис. 7.45. Распределение суммарных перемещений корпуса трансформатора тока в различные моменты времени: а) 0.0005 сек; б) 0.001 сек; в) 0.0015 сек

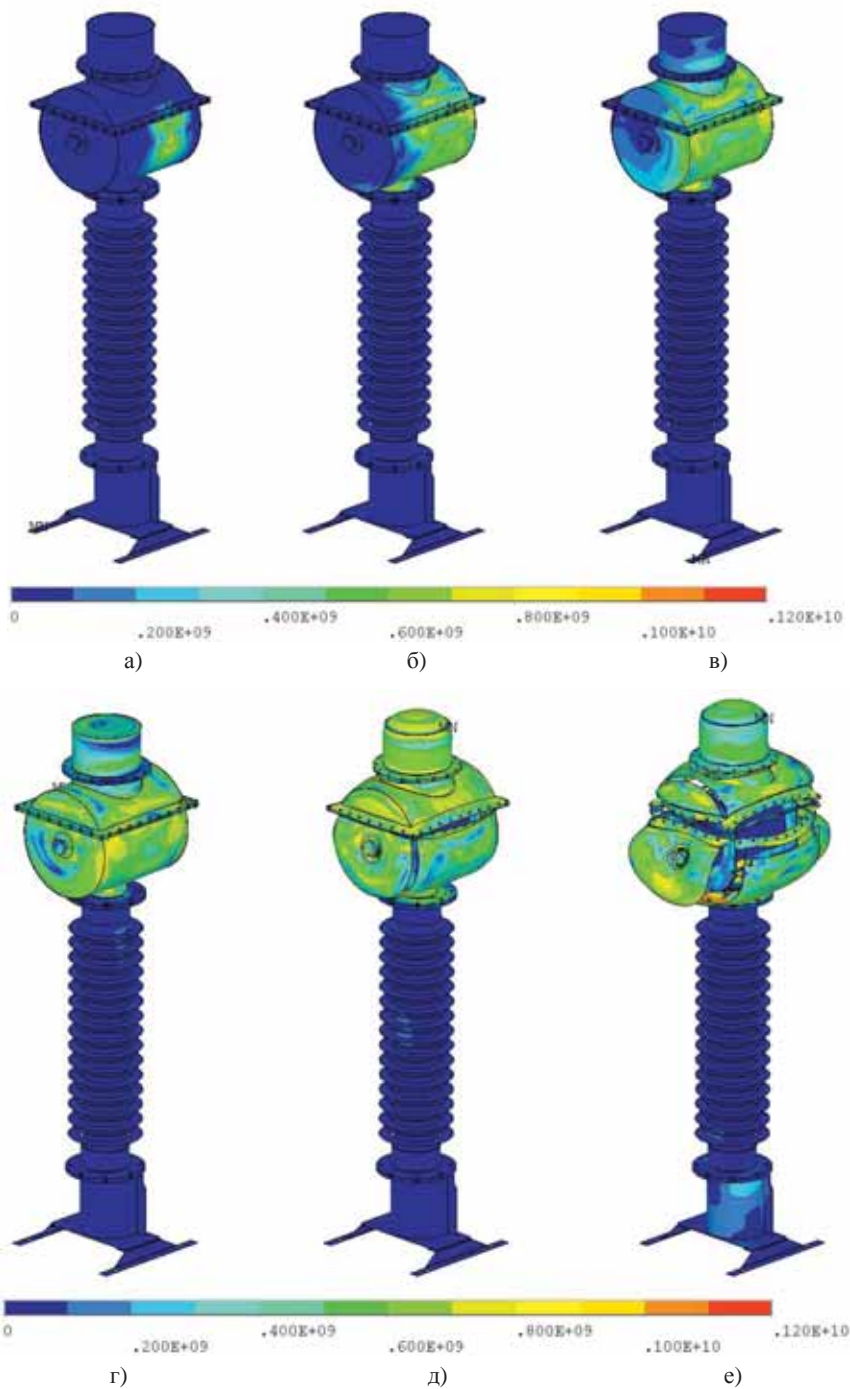


Рис. 7.46. Распределение интенсивности напряжений по Мизсу в корпусе трансформатора тока в различные моменты времени: а) 0.0001 сек; б) 0.0002 сек; в) 0.0003 сек; г) 0.0005 сек; д) 0.001 сек; е) 0.0015 сек

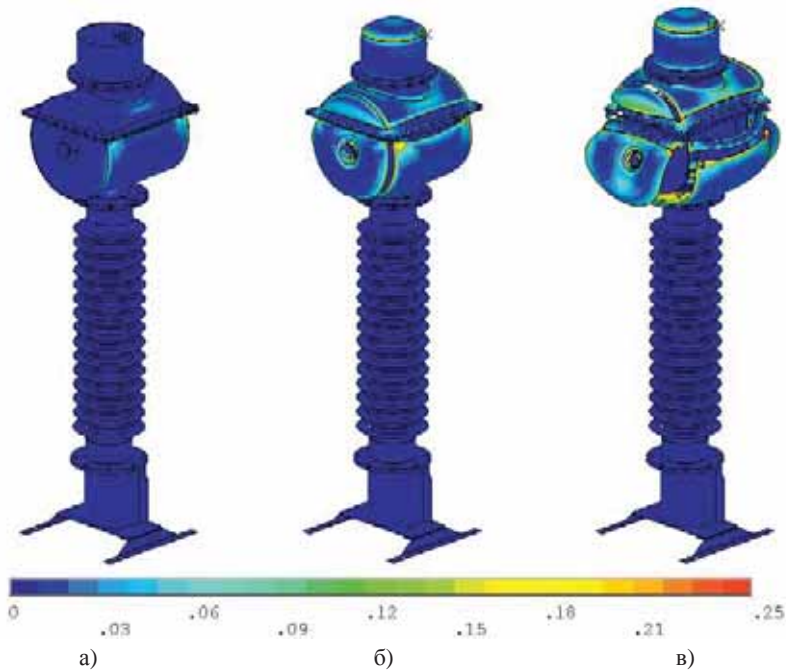


Рис. 7.48. Распределение интенсивности пластических деформаций в корпусе трансформатора тока в различные моменты времени: а) 0.0005 сек; б) 0.001 сек; в) 0.0015 сек

На рис. 7.45–7.46 показаны распределение суммарных перемещений, интенсивности напряжений по Мизесу и интенсивности пластических деформаций в корпусе трансформатора тока в различные моменты времени, соответственно.

Как видно из представленных рисунков, происходит разрыв корпуса масляного бака.

Характер изменения скоростей деформирования, напряжений и пластических деформаций в точке разрушения (точка D на рис. 7.43) корпуса трансформатора тока аналогичен точке A (рис. 7.34) корпуса трансформатора мощности.

Литература

1. Foata M., Dastous J.B. Power transformer tank rupture prevention. Report A2_102_2010 on 43th CIGRE Sessions. Paris. 2010.
2. Foata M., Khouzam G. Power Transformer Tank Rupture // Canadian Electrical Association, Engineering and Operating Division, Toronto, March 1994.
3. Ham J.K., Lee J.Y., Yang J.C., Lee J.K. Tank rupture prevention technology for a large power transformer. Report A2_103_2010 on 43th CIGRE Sessions. Paris. 2010.

4. A new approach to design of oil-filled transformers with high fire and explosion safety / L.A.Darian et al. Report A2_106_2010 on 43th CIGRE Sessions. Paris. 2010.

5. *Kuznetsov N.M.* “Equation of state and heat capacity of water in wide range of thermodynamic parameters” (J. Appl. Mech. Tech. Phys., 1961, N 1, p. 112)

6. *Tenbohlen S., Weinlader A., Wittmaack R.* Prediction of the Oil Flow and Temperature Distribution in Power Transformers by CFD. Report A2_301_2010 on 43th CIGRE Sessions. Paris. 2010.

7. “Optimization of transformer overload using advanced thermal modeling”. P. Picher, F. Torriano, M. Chaaban. Report A2_305_2010 on 43th CIGRE Sessions. Paris. 2010.

8. *Lee J.Y., Lee S.W., Woo J.H., Hwang I.S.* “CFD analyses and experiments of a winding with zig-zag cooling duct for a power transformer”. Report A2_310_2010 on 43th CIGRE Sessions. Paris. 2010.

9. *Eriksson G., Johansson K., Johansson L., Gafvert U.* “Modeling and Measurements of VFT Properties of a Transformer to GIS Bushing”. Report A2_302_2010 on 43th CIGRE Sessions. Paris. 2010.

10. *Андерсон Д., Таннехилл Дж., Плетчер Р.* Вычислительная гидромеханика и теплообмен: В 2-х т.: Пер. с англ. – Москва: Мир, 1990. Т. 1–384 с.

11. *Дунаев В.А.* Численное моделирование взаимодействия газовой струи с элементами конструкций. // Прикладные задачи газодинамики и механики деформируемых и недеформируемых твердых тел. – Тула: ТулГУ, 1996. – С. 109–115.

12. *Белоцерковский О.М., Давыдов Ю.М.* Метод крупных частиц в газовой динамике: Вычислительный эксперимент. – Москва: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1982. – 392 с.

13. *Коллинз Дж.* Повреждение материалов в конструкциях. Анализ, предсказание, предотвращение. Пер. с англ. – Москва: Мир, 1984. – 624 с.

14. ANSYS LS-DYNA User’s Guide. – SAS IP, Inc. – 2009.

15. *Биргер И.А., Шорр Б.Ф., Иосилевич Г.Б.* Расчет на прочность деталей машин. Справочник. 4-е изд., доп. - Москва: Машиностроение, 1993. – 639 с.

16. *Троценко В.Т., Лебедев А.А., Стрижало В.А. и др.* Механическое поведение материалов при различных видах нагружения. – Киев: Логос, 2000. – 571 с.

17. Прочность материалов и конструкций. Ред. кол.: Троценко В.Т. (Отв. ред) и др. – Киев: Академперіодика, 2005. – 1088 с.

18. *Майборода В.П., Кравчук А.С., Халин Н.Н.* Скоростное деформирование конструкционных материалов. – Москва: Машиностроение, 1986. – 264 с.

19 *Len Schwer.* Optional strain-rate forms for Johnson-Cook constitutive model and the role of parameter epsilon_0¹. – The 6th European LS-DYNA Conference, 2008.

ГЛАВА 8. ДИНАМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТИ ВМЭО

8.1. ПРОБЛЕМА ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ТРАНСФОРМАТОРОВ ОТ ВЗРЫВА И ПОЖАРА

Как описывалось во Введении, актуальность в разработке эффективной системы защиты трансформаторов от взрыва и пожара обусловлена огромным экономическим и экологическим ущербом и тяжелыми социальными последствиями, происходящими при коротком замыкании. При общепринятом уровне риска для технических систем $10^{-4} \dots 10^{-5}$, для трансформаторов этот уровень весьма высок и он близок к 10^{-2} (из 100....200 трансформаторов один из них подвержен короткому замыканию).

Динамическими системами взрывобезопасности высоковольтного маслонаполненного оборудования называются такие системы, которые основаны на реакции системы за характерные времена порядка времени развития взрыва. Поскольку взрыв связан с преобразованием химической энергии трансформаторного масла в тепловую в процессе возникновения короткого замыкания, при этом образуется высокотемпературная газовая фаза и возникает волна дефлаграционного или детонационного горения, которая при достижении стенки приводит к разрушению корпуса трансформатора. При взрыве детонация трансформаторного масла в смеси с окружающим воздухом происходит за характерные времена порядка миллисекунд, за которые образуются мощные тепловые и ударные волны с возникновением пожара. В динамических системах защиты от взрывов и пожаров происходит распространение волн давления в виде ударных волн скачкообразно при детонации, или в виде волн медленного горения при дефлаграции.

В данной главе описана французская система защиты от взрывов и пожаров компании «SERGI» по той причине, что эта система получила широкое распространение во всем мире и является некоторым стандартом для систем взрывобезопасности высоковольтных трансформаторов. Тем более необходим детальный анализ работы данной системы с точки зрения фундаментальных и прикладных вопросов физики, химии, материаловедения и других смежных вопросов. Анализ работы системы «SERGI» проводился и другими авторами, которые пришли к выводам, аналогичным нашим. Данная часть работы не направлена на дискредитацию системы «SERGI», а вызвана желанием разобраться в вопросах физики, химии и материаловедения, лежащих в основе этой системы и найти другие варианты систем взрывобезопасности высоковольтного маслонаполненного оборудования, которые в какой-то мере учили бы опыт работы системы «SERGI».

8.2. СИСТЕМА ЗАЩИТЫ ОТ ВЗРЫВА И ПОЖАРА ТРАНСФОРМАТОРОВ ФИРМЫ «SERGI»

В практике обеспечения защиты трансформаторов от взрыва и пожара наиболее полные исследования проведены французской компани-

ей «SERGI», которая разработала систему защиты «TRANSFORMER PROTECTOR» (TP). На сегодняшний день это компания с более чем 100 сотрудниками по всему миру, которая управляет двумя подразделениями во Франции, одна в Индии, другая в Бразилии, США и в Перу. SERGI имеет два производственных предприятия, одно во Франции и другое в США. SERGI продает в среднем примерно 400 систем TP в год за три года (2015–2017).

Система защиты компании «SERGI» относится к динамическим системам, поскольку основана на сбросе давления и высокоскоростном выводе продуктов сгорания в атмосферу. Система TP (рис. 8.1) состоит из: модуля снижения давления (сброса давления) (2, 3) и регулятора напряжения под нагрузкой (РПН) (1'), клапана защиты от ударной волны (4), модуля отделения масла и газов (5), отсечного клапана расширителя (6) и модуля устранения взрывчатых газов (7) – баллон с азотом с системой трубопроводов.

Основой системы TP является модуль снижения давления (2, 3), включающий в себя разрывной диск (диафрагму), изолирующий вентиль и уплотнитель вибрации.

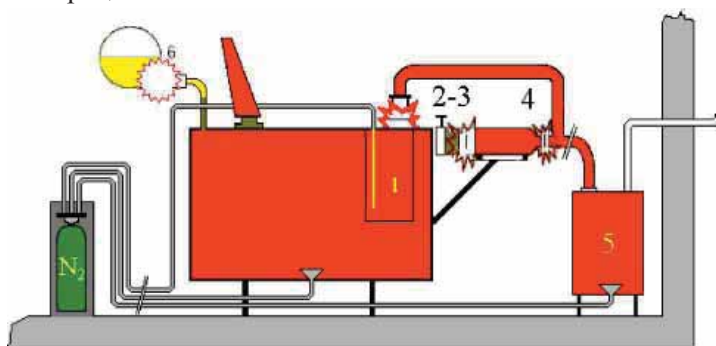


Рис. 8.1. Система защиты трансформаторов (TP) от взрыва и пожара компании «SERGI»: 1 – масляный бак; 1' – регулятор напряжения под нагрузкой; 2,3 – модуль снижения давления (сброса давления); 4 – клапан защиты от ударной волны; 5 – модуль отделения масла и газов; 6 – отсечной клапан расширитель; 7 – модуль устранения взрывчатых газов; N_2 – баллон с азотом с системой трубопроводов

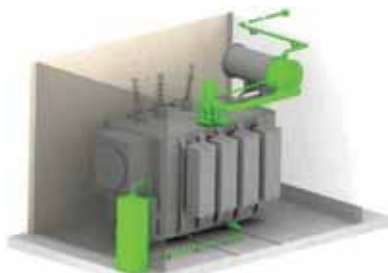


Рис. 8.2. Внешний вид трансформатора, оборудованного системой SERGI

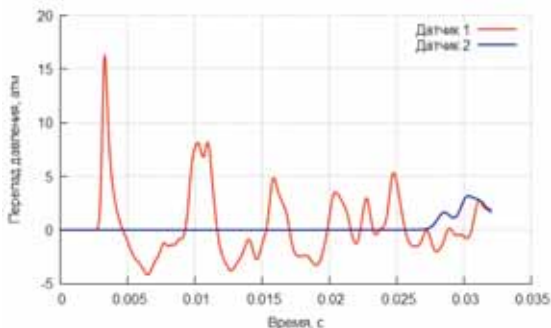


Рис. 8.3. Показания датчиков давления, установленные в различных местах бака

Как только внутри масляного бака (1) или бака РПН (1') достигается критический уровень давления, модуль снижения давления активизируется механически и автоматически, что позволяет, по мнению разработчиков, мгновенно сбросить давление, затем открывается клапан защиты от ударной волны (4), запускается модуль устранения взрывчатых газов, в результате чего смесь масла и газов поступает в бак отделения масла и газов (5). Отсечной клапан расширителя (6) закрывается. Один из индикаторов модуля снижения давления инициирует подачу азота в ряд точек трансформатора для снижения температуры масла и прекращения генерации взрывчатых газов. Взрывчатые газы из бака разделения (5) отводятся в безопасное место, где они могут сгореть.

- Система SERGI не всегда срабатывает
- Статическое давление не растет монотонно (рис. 8.3.)
- Давление на стенки локализовано вблизи места образования дуги
- Взрыв без нарушения корпуса трансформатора не так катастрофичен, что не учитывается в системе SERGI.

В результате многолетнего опыта использования системы TP во многих странах были выявлены следующие недостатки данной системы защиты трансформаторов от взрыва и пожара.

1. Физическая модель защиты не учитывает в полной мере деформируемость стенок масляного бака, в части возникновения вибрации корпуса, что приводит к недопустимо большим погрешностям в определении нагрузок при образовании парогазовой среды в случае короткого замыкания. Деформация стенок масляного бака при больших градиентах нарастания давления приводит к вибрации корпуса, что отягощает проблему защиты трансформатора. Оценки расчеты (Гл.8) показывают, что корпус масляного бака будет подвержен вибрации с периодом колебаний $T = 5.9$. мс и амплитудой колебаний 0,7–1,3 см.

2. Основной узел системы защиты – декомпрессионная камера не обеспечивает в большинстве случаев безопасные нагрузки, рекомендуемые фирмой «SERGI» в одну избыточную атмосферу. Это объясняется тем, что объем генерируемых при коротком замыкании паров масла и горючих газов, создающих избыточное давление в трансформаторе, существенно превосходит объем удаляемого из бака и поступающего в декомпрессионную камеру масла. Следовательно, сжимающее действие газовой среды, своего рода «газодинамического поршня», не позволит снизить давление до безопасного.

3. До конца не вскрыты все факторы, влияющие на скорость нарастания давления при коротком замыкании. В частности, решающую роль, кроме силы тока, играет объем масляного бака, а также деформируемость стенок бака.

4. Испытания проводились на установках, значительно отличающихся по характеристикам системы защиты от рекомендуемой и внедряемой фирмой «SERGI», для реальных трансформаторов различного типа.

5. Система защиты не гарантирует взрыв паров масла и горючих газов в декомпрессионной камере и баке отделения газов от масла, так как до срабатывания системы в этих полостях находится воздух.

6. Система не рассчитана на обеспечение защиты при длительности короткого замыкания более 15...25 мс при силе тока более 20 кА.

7. Система подачи азота в масляный бак не решает проблему предотвращения пожара и взрыва и является излишней, так как азот будет выдавливать масло через неплотности в атмосферу, создавая условия для пожара.

8. Не описаны испытания защитной системы на реальном объекте.

9. Отсутствуют четкие рекомендации и не разработана методика расчета параметров (диаметра и др.) защитных элементов системы защиты для трансформаторов различных токов и мощности. Не учтена в полной мере специфика защиты вводов.

Система защиты неоправданно сложна. Ее внедрение вряд ли приведет к снижению существующей величины риска до требуемого значения 10^{-4} – 10^{-5} .

10. Оптимальным узлом в системе защиты «SERGI» является разрывной диск, а также устройство для отключения напряжения при коротком замыкании. Применительно к российским трансформаторам разрывной диск следует проектировать на срабатывание при избыточном давлении $\Delta p \approx 0.4$ атм.

Динамические системы защиты трансформаторов, разработанные в ОИВТ РАН будут изложены в отдельном издании.

Литература

1. *G. Perigaud, H. Cuny, S. Prigent, P. Magnier*, “Transformer Explosion and Fire Prevention, Live Tests on Large Transformers: Analysis and Simulations”, Australia, TechCon 2006.

2. *G. Perigaud, S. Muller, G. de Bressy, R. Brady and P. Magnier*, Prevention of Oil-Filled Transformer Explosions. Transformer Protector Corporation. 2012

3. Test Protocol SERGI, DVLA TR-5098/05-C ELETROBRAS SVSTEM. Cidade Univer-sitaria. CEPTEL 2005.

4. *A. Magnier* (Vice President SERGI Transformer Protector). Interview of SERGI TP to Transformer Magazine, April 2017.

ГЛАВА 9. ДЕМПФЕРНЫЕ СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ КОРПУСОВ ВМЭО

В данной главе рассматриваются различные варианты использования демпферных систем для снижения нагрузки на корпуса оборудования, включая высоковольтное оборудование, такое как силовые маслонаполненные трансформаторы. Эти системы могут содержать газы, жидкости или газожидкостные системы при нормальном или высоком давлении, или высокие давления могут создаваться при взрывах при коротких замыканиях в высоковольтном оборудовании. Эти методы могут использоваться в самых различных системах, таких как металлические корпуса в резервуарах высокого давления, корпусах подводных объектов и других системах. В ряде объектов создаются ударные волны, которые распространяются в газовой и конденсированных средах, распространяющихся до ограничивающих газовой или жидкостные системы, твердые деформируемые и/или разрушающиеся материалы. В настоящее время большое значение для моделирования или тестирования имеют расчетные программы и коды, как коммерческие специализированные, так и разработанные самостоятельно (inhouse) программы расчета возникновения, распространения и развития возмущений, конечных деформаций и разрушения систем. Методы моделирования газожидкостных и пористых деформируемых систем до сих пор специально не рассматривались, поэтому в данной главе приведены теоретические обоснования и методы расчета динамических процессов в газогидродинамических процессах, в различных системах, включая пористые материалы. Пористый алюминий нашел применение в следующих областях: подготовка сжатого воздуха, фильтрация природного газа, масел и топлива, очистка горячих сред, аэрация жидкостей, системы пневмотранспорта, снижение шума пневматических устройств и т.д.

9.1. ПЕНОМЕТАЛЛЫ

Пористые металлы (пенометаллы) появились в литературе и применениях в 1990-х годах. В последние годы различные виды пенометаллов начинают широко применяться в различных областях в связи с тем, что они обладают комплексом эффективных свойств: низкая масса, высокие удельные свойства, способность значительно поглощать шум, теплоту, энергию удара и др. Пенометаллы не засоряют фильтруемую жидкость продуктами фильтра, легко подвергаются механической обработке и сварке, допускают многократную регенерацию, обладают высокой тепло- и электропроводностью [2].

Среди пенометаллов особое место занимает *пеноалюминий*, обладающий многими замечательными технологическими и эксплуатационными свойствами. Пеноалюминий (пористый алюминий) – металл с закрытыми (открытыми) порами, получаемый методами литейной и порошковой технологий. Пеноалюминий обладает малой плотностью – от 0,4 до 1,0 г/см³,

хорошими теплоизоляционными и звукопоглощающими свойствами, высокими энергосберегающими свойствами и высокой прочностью. Кроме того, он имеет низкую электрическую и термическую проводимость по сравнению с алюминиевыми сплавами, может применяться в широком интервале температур и является негорючим материалом при температуре около 800 °С. Пенометалл – металл или сплав ячеистого строения, состоит из тонких металлических оболочек, заполненных газом [4]. Пенометаллы производятся из расплавленных металлов путем впрыска (вдувания) газов (воздуха, инертных газов) либо путем стимулирования местного образования газов введением газвыделяющего реактива (порофора), в качестве которого в основном используются гидрид титана (TiH_2) и карбонат кальция ($CaCO_3$). Существует технология получения пенометаллов из смеси порошкообразных сплавов и газвыделяющего реактива [2]. Свойства пенометаллов зависят от количества пузырьков газа и свойств исходного металла. Известны пенометаллы на основе алюминия, меди, никрома, магния, стали и других металлов. Пенометаллы используются в качестве наполнителей (для обеспечения жесткости конструкции), а также как теплоизолирующие материалы и т.п. [3]. Пенометалл обычно сохраняет часть физических характеристик исходного металла: например, пенометалл, изготовленный из негорючего металла, будет негорючим. Его можно переработать обратно в исходный металл. Степень термического расширения при этом сохраняется, а теплопроводность уменьшается [2].

Области применения пенометаллов – самые разнообразные. В ближайшем будущем пенометалл может стать основным материалом в машиностроении. Пенометалл подходит для создания крупногабаритных прочных конструкций. Он способен обеспечить рациональные соотношения прочности и массы машины. Пенометалл будет активно применяться в космических технологиях, где снижение массы имеет большое значение. Пенометаллы из алюминия, магния, стали, титана или цинка выдерживают высокое давление, приглушают звук, ослабляют вибрации, хорошо изолируют. Они легко поддаются механической обработке: сверлению, распиливанию и фрезерованию, поэтому они хорошо подходят для защиты от ударов в автомобилях, в качестве катализаторов в химии, в изготовлении топливных элементов, а также как биологически совместимый протез костной ткани в медицине [2]. В авиакосмической промышленности замена пенометаллическими панелями дорогостоящих сотовых конструкций может сократить издержки производства.

Широкое применение открывается в строительстве и для вспененных заготовок, возможно также создание конструктивных элементов с основой из пенометалла, покрытого слоями алюминия, стали, пластмассы или углеродных волокон. Эти технологии пригодны для производства крупных серий и полностью автоматизированы, что, например, разработано в Институте производственных технологий и прикладного материаловедения им. Фраунгофера в Бремене (Германия) [2].

9.1.1. ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ПЕНОМЕТАЛЛОВ

В настоящее время существует несколько различных способов получения пенометаллов: литейный, порошковый и др., каждый из которых может подразделяться еще на несколько вариантов. Основным структурным элементом является ячейка, представляющая собой по форме вытянутый пентагональный эллипсоид вращения [1]. Пенометаллы могут быть изготовлены из различных базовых материалов: никель, медь, железо, нихром, алюминий, фехраль, хромаль, нержавеющие стали и сплавы, бронзы, монель, кобальт, родий, платина, золото, серебро и другие. Пенометаллы используются в различных приложениях, в то же время для широкого круга возможных потребителей они до сих пор малоизвестны.

Существует много способов получения пористых металлов и, в частности, пеноалюминия. В настоящее время в мировой практике наиболее популярными являются два направления получения пеноалюминия: литейный метод (компания Sumat – Канада, Alcan – Канада, Norsk Hydro – Норвегия и др.) и порошковый метод (компании Fraunhofer Institute – Германия, ОАО ВИЛС – Россия и др.) [1]. В производстве пенометаллов используются порообразователи (порофоры), в качестве которых применяются гидриды титана, бария, магния, циркония; карбонат кальция; хлорид натрия; водорастворимые наполнители и др. В получении пористых металлов используется вспенивание с помощью специальных химических добавок, вводимых в расплав порофоров (газообразователей). Порофоры – это химические соединения, которые при нагревании разлагаются, выделяя газ, вспенивающий металл. На качество пенометалла влияют многие факторы, и поэтому важен правильный выбор порофора, учитывающий особенности переработки и использования материала. Порофор должен разлагаться при температуре, близкой к температуре плавления металла, выделяя как можно больше газа, поэтому основные технические характеристики порофора – температура его разложения и количество газа, выделяющееся при реакции. Основными порофорами, используемыми для получения пенометаллов, являются гидрид титана (TiH_2), гидрид бария (BaH_2), гидрид магния (MgH_2), гидрид циркония (ZrH_2), карбонат кальция ($CaCO_3$).

Гидрид титана – TiH_2 , серый порошок с металлическим блеском, молекулярная масса 49,90 г, плотность 3,779 г/см³, температура разложения 400–700 °С [25].

Гидрид бария – BaH_2 , белое кристаллическое вещество, молекулярная масса 139,34 г, плотность 4,21 г/см³ (при 20 °С), температура плавления (разложения) 675–1000 °С. Гидрид бария при нагревании плавится и разлагается [4].

Гидрид магния – MgH_2 , мелкий белый порошок со слабым серым окрашиванием. Молекулярная масса 26,31 г, плотность 1,419 г/см³, температура разложения 400–500 °С [1].

Гидрид циркония – ZrH_2 , хрупкий серо-черный порошок. Молекулярная масса 93,22 г, плотность 5,62 г/см³, температура разложения 700–800 °С [1].

Карбонат кальция (мел, мрамор, известняк) – CaCO_3 , неорганическое химическое соединение, соль угольной кислоты и кальция. В природе встречается в виде минералов – кальцита, арагонита, является главной составной частью известняка, мела и мрамора. Твердый белый порошок, молекулярная масса 100.09 г, плотность 2,74 г/см³, температура плавления кальцита – 825 °С, арагонита – 1339 °С. Температура разложения карбоната кальция 600–1100 °С. Разлагается на оксид – негашеную известь CaO и кислотный..оксид – ..углекислый..газ CO_2 ..по..уравнению: $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ [4].

Для получения пеноалюминия можно применять практически любые алюминиевые сплавы, однако предпочтительнее сплавы с широким интервалом кристаллизации (сплавы на основе систем Al-Cu, Al-Mg, Al-Si), так как для процесса вспенивания важно, чтобы они находились в твердом или жидком состоянии. Наиболее подходящими порофорами для пеноалюминия являются порошки гидрида титана и карбоната кальция (мел, мрамор). При температуре разложения порофоров алюминиевые сплавы имеют практически нулевую прочность и выделяют газы, которые могут легко образовывать поры в твердо-жидком алюминиевом сплаве, приводя к его вспениванию с последующим фиксированием полученной структуры принудительным охлаждением. В зависимости от состава сплава (от вида добавок к алюминию), от режима нагревания, а также от применения того или иного газообразующего порошка материал приобретает разную плотность, пористость, получает заданные химические характеристики. Анализ способов получения пеноалюминия по данным литературного обзора и патентного поиска показывает, что литейный (жидкофазный) способ получил наибольшее распространение, как наиболее производительный и дешевый [1].

Литейный процесс при этом включает следующие технологические операции: приготовление расплава – замешивание твердых загущающих (увеличивающих вязкость) частиц в расплав; замешивание порофора в расплав или продувку расплава газом; разливка пенящегося металла в форму; затвердевание (кристаллизация) пенящейся массы в форме.

Пористый алюминий, полученный по технологии литья (ПЛА), является эффективной заменой спеченных и сетчатых материалов. Он имеет высокую прочность, термостойкость и рабочий ресурс. Технология ПЛА позволяет выпускать фильтроэлементы и пневмоглушители любых форм и размеров. Пористый алюминий нашел применение в следующих областях: подготовка сжатого воздуха, фильтрация природного газа, масел и топлива, очистка горячих сред, аэрация жидкостей, системы пневмотранспорта, снижение шума пневматических устройств и т.д. Сегодня изделия из ПЛА используют сотни предприятий в России и за рубежом [4].

Композитный пенометалл представляет собой металлическую пену, изготавливаемую различными методами из самых разных типов металла, включая алюминий и сталь. Пенометалл, в частности, можно изготовить, пропуская через металлический расплав горячий газ. Другими способами является литье расплавленного металла в форму со стальными, титановыми

или керамическими полыми шариками разного диаметра. Получившийся в результате материал имеет небольшую массу, но обладает высокой прочностью и малой теплопроводностью.

9.1.2. Типы и общие свойства пенометаллов

Пеноникель (рис. 9.1). Пеноникель, разрабатывается, в частности, российской компанией «Новомет-Пермь». По данным этой фирмы, такой материал обладает экстремально высокой сообщающейся пористостью 96 % и экстраординарными свойствами. Это структурный аналог открытого ячеистого пенополиуретана, с высокой химической и термической стойкостью, металлической прочностью и жесткостью, низким гидравлическим сопротивлением и развитой удельной поверхностью. Пеноникель – необычайно пластичен и технологичен, поддается различным видам механической обработки для придания изделиям требуемой геометрической конфигурации [8]. Пеноникель характеризуется дискретно варьируемым размером пор от 10 до 80 ppi (пор/дюйм) и плавно регулируемой плотностью от 0,3 до 1,5 г/см³ [4]. Уникальные свойства пеноникеля делают его пригодным для широкого диапазона применений.

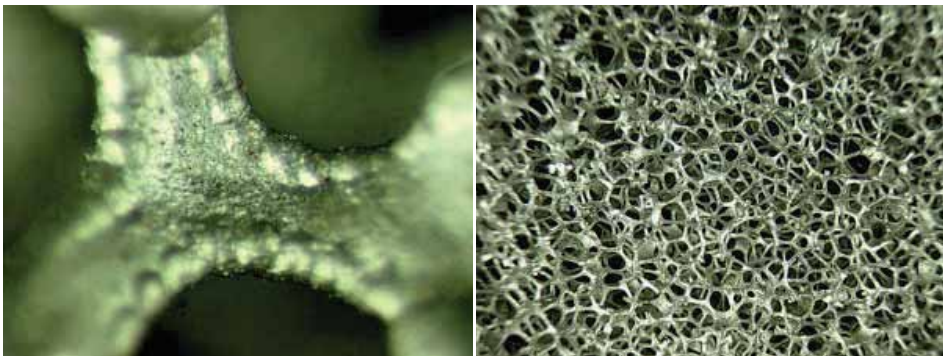


Рис. 9.1. Микроструктура пеноникеля [4]

Среди них: теплообменники, пламепреградители, звукоизолирующие устройства, гомогенизаторы жидкостей и газов, электрофильтры, адсорберы, наполнители многослойных конструкций, применяется в аккумуляторных электродах, топливных элементах, электролизерах, шумопоглотителях, катализаторах, уловителях аэрозолей и др. [2]. Изделия из пеноникеля для фильтроэлементов имеют тонкость фильтрации 2,5–0,3 мм [2].

Пеномедь (рис. 9.3). Пеномедь широко используется в теплообменных и теплоотводящих устройствах, в демпферах механических и акустических импульсов, в смесителях газов; в уловителях аэрозолей, в биоцидных фильтрах [2].

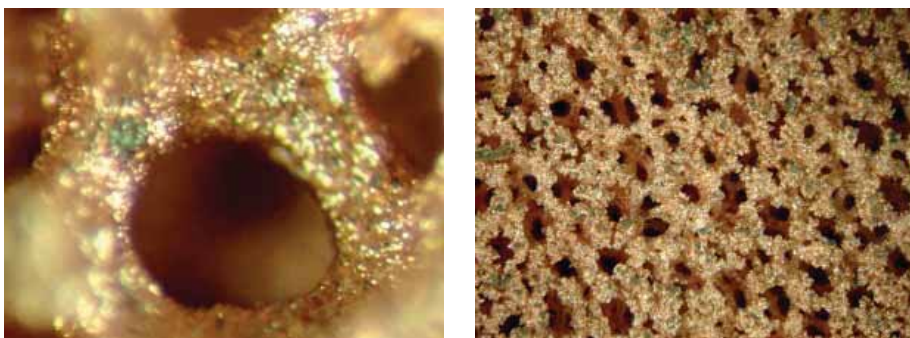


Рис. 9.2. Микроструктура пеномеди [4]

Пеномедь обладает рядом полезных свойств, значительно проводит тепло и электрический ток. Может быть произведена как наполнитель в стальных деталях (рис. 9.2) [2]. Пеномедь может быть использована в: материалах фильтрации воздуха/масла/дыма и т.д., устранении температурного перегрева материалов электронных приборов, в шумопоглощающих элементах, в электродных материалах для батарей, таких как литий-ионные батареи, топливные элементы и т.д., в качестве декоративных материалов для строительства, в носителях катализаторов и др. [4].



Рис. 9.3. Стальной цилиндр (трубка),
заполненная пеномедью [2]



Рис. 9.4. Микроструктура пенонихрома [4]

***Пенонихром** (рис. 9.4). Пенонихром применяется в качестве жаростойких носителей катализаторов, фильтров, огнепреградителей, инфракрасных излучателей, электрических нагревателей, конструктивных элементов, ловителей аэрозолей [4].*

***Пеносталь** (рис. 9.5). Пеносталь является материалом, устойчивым к коррозии, обладает отличными показателями ударостойкости, высокой прочностью и антиусталостными свойствами, недорог и прост в изготовлении [2].*

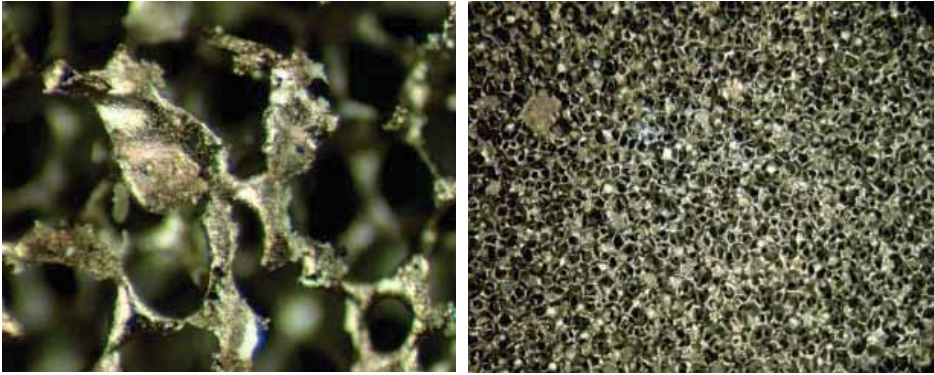


Рис. 9.5. Микроструктура пеностали [4]

Пеноалюминий (рис. 9.6). Пеноалюминий применяется в шумопоглотителях, теплообменных и теплоотводящих устройствах, заполнителях полостей и емкостей, демпферах механических, акустических и ЭМ импульсов; выравнивателях газовых потоков, несущих матрицах и регуляторах горения для твердых топлив, сэндвич-панелей и др. [4].

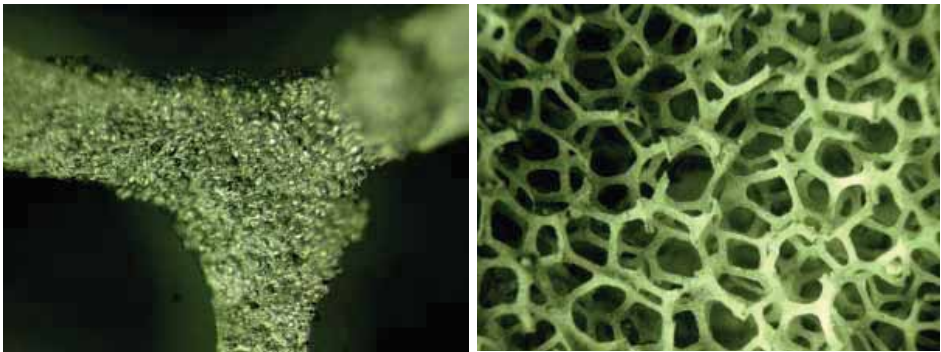


Рис. 9.6. Микроструктура пеноалюминия [4]

В последние годы в мировой промышленности проявляется повышенный интерес к пористым материалам на основе алюминия, обладающим уникальными технологическими и эксплуатационными свойствами. Пеноалюминий – материал с закрытыми порами, получаемый методом порошковой или литейной технологий [1]. Пеноалюминий – алюминий или сплав алюминия, состоящий из пузырьков газа (85–90 %) с целью образования ячеистого (пористого) строения [5].

Вспененный алюминий – принципиально новый металлический материал, сформированный в губкообразный вид, образующийся после вспенивания алюминиевого расплава путем добавления порообразователей (порофоров), либо же с помощью смешивания порошков алюминия и порофора, и дальнейшее вспенивание полученного после прессования прекурсора. Внутренняя структура пеноалюминия содержит в себе множество

пор. Пористость структуры придает вспененному алюминию большую легкость по сравнению с исходным материалом. Также возрастает способность к поглощению энергии и снижается теплопроводность. Вспененный алюминий находит сейчас все более широкое применение в промышленности, строительстве и в других технологических отраслях. Он отлично поглощает звук и при этом остается гигроскопичным и воздухопроницаемым.

Вспененный алюминий может быть применен даже в аэрокосмической промышленности, где необходимы материалы с термостабильным состоянием при температурах свыше 200 °С. Этот материал высокоэкологичен и может быть легко переработан [8].

Пеноалюминий сочетает в себе легкость и обрабатываемость алюминия с хорошей звуко- и теплоизоляцией пен. Поры замкнутые, то есть воду такой материал впитывать не должен и будет в ней плавать [16].

Пеносвинец. Пеносвинец – материал пористого строения, очень хорошо подходит для использования его в ядерной промышленности для защиты от радиации [15].

Пеножелезо. Пеножелезо можно использовать при создании брони облегченных моторов, подводных лодок, мостов и т.п. [2]. Используется для подшипников скольжения, получается из железного порошка путем сжатия, спекания, пропитывания маслом и калибровки [4].

Благодаря своим специальным свойствам, пенометаллы нашли применения во многих областях. Главная ценность пенометаллов заключается не в каком-либо одном уникальном свойстве, а в уникальной совокупности характеристик. Произвольная комбинация нескольких свойств и областей применения для одного и того же материала в одних и тех же условиях позволяет создавать принципиально новые изделия и технологии. Огромная функциональность определяет главную ценность этого класса материалов [4].

Пенометаллы обладают целым комплексом превосходных свойств: объемная масса у них ниже, чем у древесины, а прочность значительно выше; они отлично поглощают энергию удара, легко обрабатываются резанием, в них можно вбивать крепежные детали, склеивать их с другими материалами, например со стеклом, пластиками, фанерой. Металлические пены имеют трехмерный декоративный рисунок, проявляют хорошие акустические свойства. Пенометаллы хорошо свариваются, имеют высокие демпфирующие свойства и повышенную коррозионную стойкость. Прочность изделия из металлической пены значительно повышается при поверхностной обработке-прокатке, ковке, штамповке [4].

Пенометалл при его использовании, как правило, сохраняет физические свойства металла, из которого его получили. Сделанный из невоспламеняющегося металла, он останется невоспламеняющимся; пенометалл, изготовленный из любого металла может быть переплавлен. Коэффициент теплового расширения останется при этом подобным, в то время как теплопроводность будет уменьшена [4].

Таблица 9.1. Основные свойства пенометаллов [2]

Состав	Никель	Медь	Нихром	Алюминий	Сталь	Фехраль	
Свойства, коэффициенты	Ni 99,9 %	Cu 99,9 %	Ni 75 %, Cr 25 %	Al 96 %, Si 4 %	C 0,8 %	Fe 75 %, Cr 20 %, Al 5 %	
Плотность, г/см ³	мин.	0,35	0,45	0,4	0,16	0,4	0,36
	макс.	0,7	0,8	0,6	0,4	0,6	0,4
Пористость, %	мин.						
	макс.						
Модуль Юнга, ГПа	мин.	0,40	0,17	-	0,06	0,50	-
	макс.	1,00	0,37	-	0,30	1,50	-
Коэфф. Пуассона	мин.	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32
	макс.	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34

Основные свойства пенометаллов: малая плотность; достаточно малый коэффициент теплопроводности; возможность регулирования жесткости; возможность использования в широкой области температур как выше, так и ниже 0 °С; стойкость к кислотам, щелочам, растворителям; физиологическая безвредность, т.е. отсутствие запаха, неядовитость, отсутствие газовыделения даже при высокой температуре; негигроскопичность, т.е. несклонность к поглощению воды и отсыреванию на воздухе; стойкость в отношении старения, а также окисления и ржавления; негорючесть или, по крайней мере, трудная воспламеняемость; несклонность к деформациям при динамических нагрузках, стойкость в отношении вибраций и истирания; хорошая склеиваемость как между собой, так и с другими материалами; длительная плавучесть; высокая прочность при сжатии [2].

Пенометалл подходит для создания крупногабаритных прочных конструкций. Он способен обеспечить рациональные соотношения прочности и массы машины. Безусловно, пенометалл будет активно применяться в космических технологиях, где снижение массы имеет большое значение. Пенометаллы из алюминия, магния, стали, титана или цинка выдерживают высокое давление, приглушают звук, ослабляют вибрации, хорошо изолируют. Они легко поддаются сверлению, распиливанию и фрезерованию, поэтому они хорошо подходят для защиты от ударов в автомобилях, в качестве катализаторов в химии, в изготовлении топливных элементов, а также как биологически совместимый протез костной ткани в медицине [2].

В авиакосмической промышленности замена пенометаллическими панелями дорогостоящих сотовых конструкций может сократить издержки производства. В строительстве могут способствовать сокращению потребления энергии при эксплуатации лифтов, так как в условиях высоких скоростей их движения и частой смены ускорений и замедлений легкость конструкции приобретает особое значение. Широкое применение открывается в строительстве и для вспененных заготовок, которые могут, например, использоваться для закрепления штепсельных розеток в бетонной стене. Возможно также создание конструктивных элементов с основой из пенометалла,

покрытого слоями алюминия, стали, пластмассы или углеродных волокон. Эти технологии пригодны для производства крупных серий и полностью автоматизированы – разработка Института производственных технологий и прикладного материаловедения им. Фраунгофера в Бремене (Германия) [2].

9.2. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПЕНОМЕТАЛЛОВ В КАЧЕСТВЕ ДЕМПФЕРНЫХ СИСТЕМ

В последние годы повышенное внимание уделяется конституитивным соотношениям пен-связи тензоров напряжения и деформации, что связано с их малой плотностью (массой конструкций) и способностью поглощать большое количество энергии при деформации. Одной из целей исследований в Центре исследований и разработок защитных технологий Университета Бен-Гурион в Негеве [20] было изучение механизмов деформации и возможностей поглощения энергии алюминиевыми пенами, что дает возможность использовать их в качестве защитных слоев от ударных волн. Второй задачей этой группы являлась разработка численных кодов для моделирования поведения защищаемых конструкций при ударно-волновых нагрузках¹. Для достижения этой цели для конструкций, защищенных алюминиевыми пенопластами, необходимо знать механические свойства пенопластов при динамических нагрузках.

В течение последних трех десятилетий было проведено несколько исследований изучения конституитивных соотношений для алюминиевых пен. Для нагружения изделий из пен при различных скоростях деформации и напряжения использовались различные экспериментальные стенды [21]. Установлено, что исходный модуль упругости у пен ниже, чем у полностью плотных сплавов – деформации в стенках ячеек приводят к концентрации напряжений вокруг деформации, что приводит к уменьшению модуля упругости. В работах Дешпанде и Флрка [27] и Пола и Ромамурти [29] не было отмечено чувствительности к скорости деформации в отличие от работ Даннемана и Ланкфорда [28] и Мукаи и др. [30], которые обнаружили небольшую зависимость от скорости деформации. Кэди и др. [31] исследовали сжимающее поведение алюминиевой пены с закрытыми ячейками в условиях статического и динамического нагружения в зависимости от температуры. Они обнаружили, что существует сильная зависимость от приложенной температуры и небольшая зависимость от скорости деформации.

В некоторых работах проводились полевые взрывные эксперименты, но они ограничены по количеству и диагностическим возможностям, очень дороги и плохо воспроизводимы.

В работе [20] исследовано сжимающее поведение двух типов алюминиевых пен при комнатной температуре на трех различных экспериментальных установках. В каждой установке создавался свой различный профиль нагрузки на испытуемой пене. Для получения динамической сжимающей нагрузки на пенопласт были разработаны и модифицированы три лабораторные системы. Исследования статического и умеренного скоростного нагружения проводились с использованием компрессионной машины; эффекты высокого

¹ Один из авторов (Э.Е.Сон) выражает благодарность за разрешение использовать материалы статьи в данной монографии

скоростного нагружения изучались с помощью ударного маятника, а ударных нагрузочных испытаний проводились с помощью ударной трубы.

Было проведено несколько видов испытаний с целью получения механических свойств пеноматериалов для требуемых скоростей деформации. Испытания проводились для нескольких скоростей деформации с использованием следующих типов нагрузок.

1. Статические испытания с использованием компрессионной машины.
2. Динамические испытания при скорости деформации до 10 с^{-1} с использованием компрессионной машины.
3. Ударные испытания при скоростях деформации 10 с^{-1} с использованием ударного маятника массой 400 кг.
4. Ударно-волновые ударные испытания при скоростях деформации 10^2 с^{-1} с использованием ударной трубы.

В экспериментах измерялось поглощение энергии и находилась зависимость объемной деформации от давления и скорости деформации.

Первой экспериментальной системой была компрессионная машина с регулированием скорости. Машина могла произвести удар 10 кН с скоростью ударника до 3 м/с. Образцы размером 100 мм × 100 мм были обжаты при скоростях от 0,001 до 1 м/с. Постоянная скорость нагружения поддерживалась до достижения предела 10 кН. Силы и смещения были измерены с помощью датчика нагрузки.

Испытания на ударных трубах

Пластинки из алюминиевой пены помещались на торцевую стенку ударной трубы. Главным преимуществом этой системы является возможность контролировать нагрузку, изменяя интенсивность ударной волны. Для экспериментов использовались две ударные трубы (одна горизонтальная и одна вертикальная). Длина обеих труб составляла 5,5 м, а их поперечное сечение 80 × 80 мм.

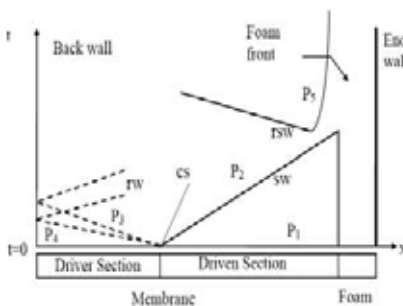


Рис. 9.7 X-t диаграмма измерения свойств пеноалюминия [20]

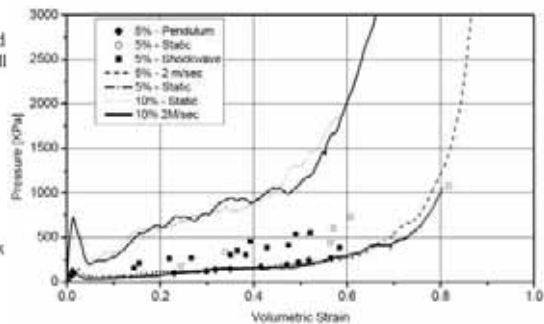


Рис. 9.8 Результаты ударно-волновых измерений свойств пеноалюминия [20]

В вертикальной ударной трубе были проведены эксперименты с числом Маха ударной волны выше 1,2. Перед алюминиевой пеной была установлена пластина из ПВХ, которая была нагружена ударной волной, чтобы избежать разрушения ячейки. Интенсивность и скорость ударной волны измерялись пьезоэлектрическими датчиками давления, установленными заподлицо на

боковых стенках ударной трубы ($x-t$ диаграмма приведена на рис. 9.7). Результаты экспериментов представлены на рис. 9.8. Результаты испытаний сжимающей машины представлены в виде непрерывных линий, а результаты испытаний для ударной трубы и маятника представлены в виде точек для различных интенсивностей ударной волны. Типичное поведение напряжения – деформации для пены с закрытыми ячейками можно видеть в испытаниях на статическое сжатие. При очень низких напряжениях пена реагирует линейно до тех пор, пока она не деформируется и ее жесткость становится отрицательной до точки полного сжатия, где она снова становится жесткой. При более высоких деформациях (около 50 % для более плотной пены и 75 % для менее плотной пены) она становится более жесткой, пока не достигнет своей твердой жесткости (не видно на графике). Результаты экспериментов для различных скоростей показывают, что существует небольшая (если таковая имеется) зависимость кривых напряжения-деформации от скорости деформации.

Результаты маятниковых испытаний хорошо вписываются в кривую статических результатов, как для пенопласта, так и для всего диапазона деформаций. Однако результаты для ударной трубы, в которых была достигнута скорость деформации 100 с^{-1} , дают более высокие значения, чем статические эксперименты.

Результаты полевых испытаний

Были проведены натурные полевые испытания с целью изучения поведения пеноматериалов при взрывных волнах, создаваемых взрывом тротила. Две бетонные плиты были установлены на расстоянии около 20 м от 1000-килограммового тротилового заряда. Одна из бетонных плит была покрыта 75 мм алюминиевой пеной в качестве буферноо защитного слоя (рис. 9.9).

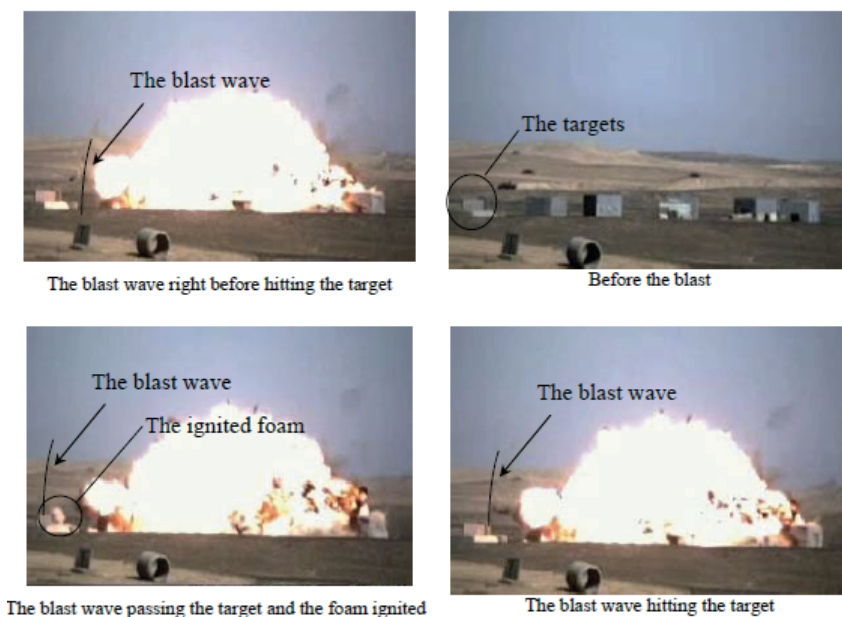


Рис. 9.9. Полевые испытания пеноматериалов при взрыве тротила

Алюминиевый слой пены был покрыт стальной пластиной толщиной 0,5 мм, чтобы предотвратить разрушение фронтальной обшивки ячеек пены взрывной волной. Обе плиты были оборудованы тензометрическими датчиками, датчиками перемещения и акселерометрами, чтобы изучить влияние слоя пены на поведение бетонной плиты. Было проведено три эксперимента, во всех результатах которых показано, что пенопласт уменьшает повреждение защищаемой бетонной плиты, как подробно описано в [21]. Толщину пены измеряли после взрыва и регистрировали профиль давления, которые были использованы для проверки того, что толщина пены после взрыва соответствует результатам лабораторных экспериментов, представленных на рис. 9.8.

9.2.1. Устойчивость пенометалла к взрыву и осколкам

Исследователи из Университета штата Северная Каролина совместно с Управлением прикладных авиационных технологий Армии США провели исследования свойств композитного пенометалла из нержавеющей стали и обнаружили, что этот материал более устойчив к воздействию взрыва и осколков, чем стандартная армейская броня. Результаты исследования опубликованы в *Journal of Composite Structures*, а их краткое изложение приводится ниже [36]. В исследовании использовались листы пенометалла длиной и шириной 25 сантиметров и толщиной 9,5 и 16,75 миллиметра. Эти пластины размещались на расстоянии 45,7 сантиметра позади алюминиевой пластины толщиной 2,3 миллиметра. По этой сборке производились выстрелы фугасно-зажигательными авиационными снарядами калибра 23 миллиметра. Алюминиевая пластина должна была вызывать подрыв снаряда, сопровождающийся ударной волной и облаком осколков, некоторые из которых летели на скорости до 1,5 км/сек. Испытания показали, что пластины толщиной 9,5 и 16,75 миллиметра выдержали воздействие ударной волны от взрыва. При этом крупные осколки смогли пробить тонкую пластину из пенометалла. Более толстая пластина остановила все попавшие по ней осколки площадью от 15 до 150 квадратных миллиметров.

Затем для контроля вместо пластин из пенометалла исследователи разместили бронепластину из алюминиевого сплава марки 5083 (алюминий с добавлением магния, марганца и хрома). Такой сплав используется для изготовления легкой брони для наземной техники, которая обеспечивает баллистическую защиту. Эта пластина также имела толщину 16,75 миллиметра и по массе соответствовала пластине из пенометалла той же толщины. Алюминиевая пластина сумела остановить ударную волну, однако при попадании осколков сильно деформировалась. Лучшая устойчивость пенометалла к взрывам и попаданию осколков объясняется локальной деформацией полостей в металле, благодаря которой повреждения не распространяются вглубь материала. Это качество в перспективе позволит использовать композитные пенометаллы в качестве легкого материала для изготовления более долговечной брони. Теперь исследователи намерены провести эксперименты на пенометалле с использованием крупнокалиберных снарядов и взрывных устройств.



Рис. 9.10. Состояние пенометалла после попадания осколков и ударной волны на поверхность [36]

В 2016 году те же исследователи обнаружили устойчивость пенометалла к нагреву. Для эксперимента они нагревали пластину из пенометалла длиной и шириной шесть сантиметров и толщиной 1,8 сантиметра. При этом исследователи измеряли, за какое время нагрев с одной стороны пластины достигнет противоположной. Для контроля они нагревали пластину из нержавеющей стали таких же размеров. В ходе эксперимента пенометалл нагрелся до 800 градусов Цельсия за восемь минут, а цельно стальная пластина – за четыре.

9.3. МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ

9.3.1. Механические свойства пеноалюминия

На рис. 9.12 представлена схема нагружения стенки, защищенной пеноалюминием, а на рис. 9.13 – образец пеноалюминия [3, 4].

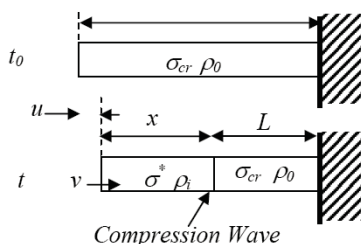


Рис. 9.12. Механизм нагружения стенки без защиты и с защитой пеноалюминием

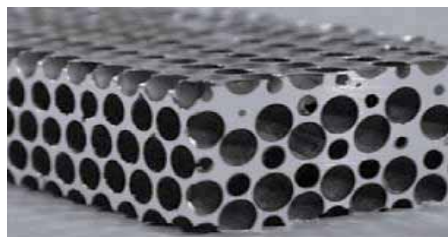


Рис. 19.13. Пеноалюминий без поверхностного покрытия защиты от проникновения масла

На рис. 9.16 и 9.17 представлены идеализированная и реальная кривые нагружения – деформирования пеноалюминия.



Рис. 9.14. Образцы пеноалюминия [20]

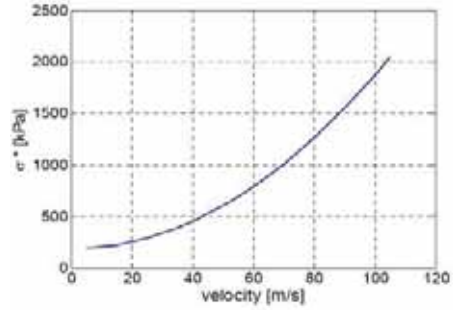


Рис. 9.15. Критический предел смятия пеноалюминия [20]

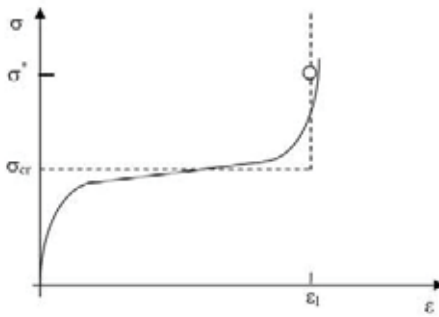


Рис. 9.16. Идеализированная кривая нагружения – деформирования пеноалюминия [20]

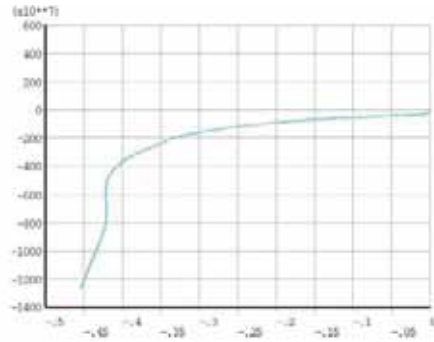


Рис. 9.17. Реальная кривая нагружения – деформирования пеноалюминия [20]

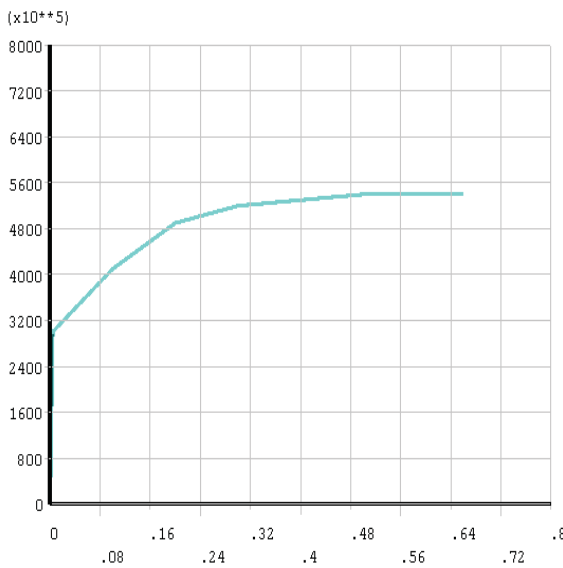


Рис. 9.18. Кривая деформирования ALCuMg1 с параметрами: плотность – 2700 кг/м³, модуль Юнга 72.7 Мпа, коэффициент Пуассона – 0.3, предел текучести – 0.3 Мпа[]

9.3.2. Измерения параметров демпферных материалов

Для испытаний фирмой «Композиционные материалы» был предоставлен **пористый алюминий**, полученный по технологии литья (ПЛА), который имеет высокую прочность, термостойкость и рабочий ресурс. Технология ПЛА позволяет выпускать **пористый алюминий** любых форм и размеров. Фирмой были поставлены образцы из двух партий пористых пеноалюминиевых материалов, отличавшихся размерами и распределением пор и, соответственно, плотностью. Результаты испытаний, размеры образцов и их веса представлены в таблицах 9.2.

Таблица 9.2. Результаты испытаний пористых пеноалюминиевых материалов

ε_1	ε_2	σ_1	ε_1	ε_2	σ_1
0	0	0	0	0	0
0,7	0,0086	7,3	0,078	0	3,5
1,1	0,0108	11	0,18	0	7
1,4	0,0758	14,6	0,29	0	10,56
1,94	0,173	18,3	0,4	0,0169	14
2,91	0,39	21,9	0,47	0,0563	17,6
4,51	0,704	25,6	0,584	0,101	21,1
7,46	1,23	29,2	0,73	0,17	24,64
9,33	2,08	31	3,06	1,29	42,2
12,43	2,4	32,9	20,44	10,35	77,4
15,54	3,44	35,1	29,47	16,59	95,3
20,2	4,48	36,5	31,54	18,06	105
21,76	5,36	38,2	38,32	23,5	123,2
24,9	6,78	42,2	44,165	30,96	153,8
28,6	9,18	43,8			
32,5	9,67	47,5			
42,3	16,4	54,8			
45,5	17,9	56,3			

Материал 1, плотность, размеры образца, вес образца, размеры пор 1

Материал 2, плотность, размеры образца, вес образца, размеры пор

9.3.3 Экспериментальные исследования статических и динамических характеристик деформирования и разрушения демпфирующих материалов

При изучении прочности пористых металлических материалов, используемых в демпфирующих элементах, особенностями по сравнению с обычными металлами, является необходимость исследования их поведения при значительных уровнях сжимающих деформаций. Из-за большого объема пор и более хаотичного характера их распределения в материале обычные для металлов уровни рассеяния механических свойств и отклонения их значений от среднестатистических величин для пористого материала реализуются в большем объеме. Вследствие этого, при проведении испытаний образцов из пористых материалов на сжатие при сравнительно небольших напряжениях (по сравнению с реальными элементами демпфирующих конструкций) с большой вероятностью может наступать потеря устойчивости деформирования, что затрудняет получение их реальных механических свойств. Такие особенности деформирования пористых материалов требуют учета их при проведении испытаний на сжатие образцов из этих материалов и при разработке оборудования для проведения прочностных испытаний.

Для получения достоверных и стабильных данных о прочностных свойствах пористых металлических материалов в условиях сжатия необходимо, чтобы испытываемые образцы имели достаточно большую площадь поперечного сечения, обеспечивающую величину рассеяния прочностных и деформационных свойств по сравнению с обычными металлами. При этом системы нагружения и измерения нагрузки и деформации должны обеспечивать возможность нагружения и измерения нагрузки, продольных и поперечных деформаций, которые могут достигать больших величин (десятки процентов). Кроме того, необходимо иметь в виду, что система нагружения используемого оборудования в процессе испытания пористых материалов для предотвращения преждевременной потери устойчивости образцов должна содержать элементы, препятствующие возможности взаимного смещения их торцевых поверхностей в поперечном направлении даже в минимальной степени. Для проведения статических и динамических испытаний демпфирующих материалов использовалась универсальная испытательная машина TIRATEST 2300 и вертикальный копер ВК-7, которые вместе составляют экспериментальный стенд. В испытаниях использовались образцы из пеноалюминия с закрытой пористостью, прямоугольной формы ($h \times a \times b$) на сжатие. Образец состоит из трех частей, которые склеены между собой эпоксидным клеем. Целью испытаний являлось определение физико-механических характеристик пеноалюминия различной плотности при статическом и динамическом сжатии при нормальной ($T=23 \pm 2$ °C) и повышенной (60 ± 2 °C) температурах. Нагрузка на образце измерялась с помощью преобразователя сил, входящего в комплект испытательной машины. Погрешность измерения нагрузки составляла ± 1 % от измеряемой величины. В осевом направлении перемещения на образце измерялись по перемещению траверсы специальным датчиком, отслежи-

вающим перемещения траверса. Погрешность измерения составляла $\pm 2\%$ от измеряемой величины. Перемещения на образце в поперечном направлении измерялась с помощью специального экстензометра представляющий собой упругий элемент с наклеенными тензодатчиками. Температура на образце измерялась с помощью цифрового четырехканального измерителя температур АТТ-2004. В качестве датчика температуры использовалась ХА термопара. Перед испытаниями на образце закреплялся упругий элемент для измерения поперечной деформации и вместе с ним он помещался в специальное приспособление (рис. 9.19), которое устроено таким образом, что при сжатии верхняя и нижняя плоскости перемещаются параллельно и не сдвигаются друг относительно друга. Приспособление в сборе с образцом устанавливалось в испытательную машину, где и проводилось испытание. Эксперименты проводились по программе сжатия со скоростью деформации $2 \div 6 \cdot 10^{-3}$. В качестве регистрирующей аппаратуры на машине ТИРАТЕСТ-2300 использовалась модульная система сбора и обработки результатов Compact DAQ, (National Instruments). Параметры нагружения образцов и результаты испытаний записывались в памяти аппаратуры, частота измерения для каждого из датчиков и составляла 10 измерений в секунду.



Рис. 9.19. Общий вид приспособления для испытаний образцов на а) статическое и б) динамическое сжатия

После статических испытаний с помощью штангенциркуля измерялись конечная высота и конечная ширина образца с целью сравнения и контроля конечных деформаций, которые были получены при испытаниях с помощью датчиков.

Динамические испытания

Динамические испытания образцов из пеноалюминия проводились на вертикальном копре ВК-10 при нормальной ($T = 23 \pm 2$ °C) и повышенной (60 ± 2 °C) температурах. Динамометр для динамических испытаний был протарирован на статической испытательной машине ТИРАТЕСТ-2300. Температура на образце измерялась с помощью цифрового четырехканального измерителя температур АТТ-2004 и ХА термопарой. Перед испытанием на образце закреплялись упругие элементы для измерения

поперечной, продольной деформаций и вместе с ними он помещался в специальное приспособление (рис. 9.19), которое устроено таким образом, что при динамическом сжатии пуансон и динамометр перемещаются параллельно и не сдвигаются друг относительно друга. Приспособление в сборе с образцом устанавливалось на копер, и проводились испытания. С заданной высоты (2,5 метра) сбрасывался груз. Эксперименты проводились по программе сжатия со скоростью деформации порядка $0.5 \div 1.0 \cdot 10^2 \text{ с}^{-1}$. Нагрузка, осевая и поперечная деформации на образце измерялась с помощью регистрирующей аппаратуры, которая тарировалась совместно с динамометром и датчиками перемещений. Параметры нагружения образцов и результаты испытаний зафиксированы в памяти аппаратуры системы сбора данных. Частота измерения для каждого из датчиков и упругих элементов (скобочки продольные, поперечные и динамометра) составляла 200 измерений в секунду. После динамических испытаний измерялись конечная высота и конечная ширина образцов, с целью сравнения и контроля конечных деформаций, которые были получены при испытаниях с использованием датчиков. Скорость падения груза во всех случаях в начальный момент нагружения составляла 7 м/с.

Влияние температуры и скорости деформирования на механические свойства пеноалюминия

Статические испытания пеноалюминиевых образцов серии А с вытянутыми порами и плотностью $0.615\text{--}0.628 \text{ г/см}^3$ при нормальной ($T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$) и повышенной ($T = 60 \text{ }^\circ\text{C}$) температурах показали, что диаграммы сжатия (рис. 9.6–9.9 и 9.20–9.23) и характеристики разрушения (Таблица 9.2) практически совпадают. Испытания образцов серии Б с круглыми порами и плотностью $0.529\text{--}0.576 \text{ г/см}^3$ также показали незначительное влияние температуры на диаграммах сжатия (рисунки 9.10–9.13 и 9.24–9.25).

Статические испытания образцов серии В с круглыми порами и плотностью $0.334\text{--}0.343 \text{ г/см}^3$ показали некоторое влияние температуры на диаграммы сжатия (рис. 9.20–9.23) и незначительное влияние на характеристики разрушения. Диаграммы сжатия при температуре $60 \text{ }^\circ\text{C}$ несколько ниже на 2–4 МПа диаграмм сжатия при нормальной температуре. При динамических испытаниях образцов серии А и Б влияние температуры незначительно, а при испытаниях образцов серии В наблюдается небольшое снижение диаграммы сжатия (2–4 МПа). Влияние скорости деформирования на диаграммы сжатия показано на рис. 9.22, 9.23, а влияние на характеристики разрушения в табл. 9.2. Весь процесс динамического деформирования имел длительность порядка 10 мс, что обеспечило скорость деформирования порядка $0.5 \div 1.0 \cdot 10^2 \text{ с}^{-1}$. Наблюдается повышение диаграмм сжатия при динамическом нагружении по сравнению со статическим (до 5 МПа), а также снижение характеристик разрушения образцов серии А и Б и повышение характеристик разрушения образца серии Б при температуре $60 \text{ }^\circ\text{C}$.

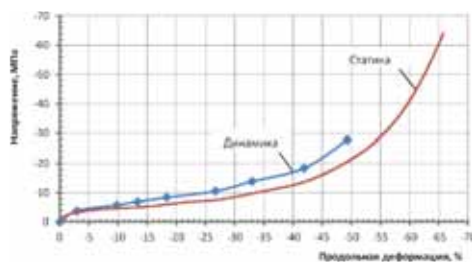


Рис. 9.30. Диаграммы динамического и статического сжатия пеноалюминиевого образца

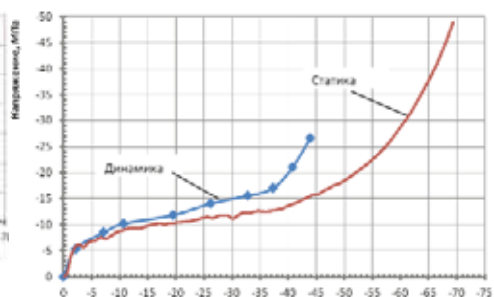


Рис. 9.21. Диаграммы динамического и статического сжатия пеноалюминиевого образца

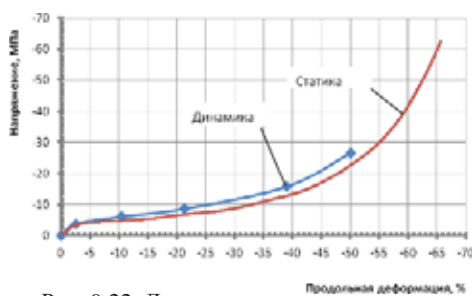


Рис. 9.22. Диаграммы динамического и статического сжатия пеноалюминиевого образца № А8 при температуре $60 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$

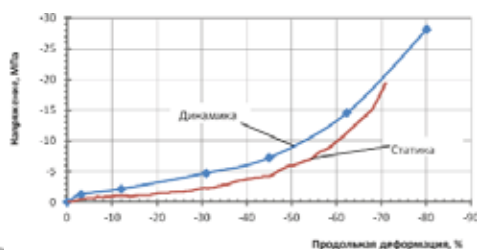


Рис. 9.23. Диаграммы динамического и статического сжатия пеноалюминиевого образца № В4 при температуре $60 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$

9.4. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПЕНОАЛЮМИНИЯ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ВМЭО

При электровзрыве масляного трансформатора происходит разрушение стенок с выбросом масла и при сильном взрыве осколки взрыва могут повредить близлежащие трансформаторы. Для защиты трансформатора от взрыва нами впервые предложена демпферная система защиты трансформаторов, основанная не на увеличении объема полости трансформатора, а на защитных свойствах пеноалюминия, который при взрыве сминается, и энергия взрыва затрачивается на смятие пеноалюминия, сохраняя невредимыми стенки трансформатора.

9.4.1. Метод введения демпфирующего воздушного объема внутри маслянаполненного трансформатора

Для снижения жесткости системы «трансформаторное масло–корпус», приводящей к взрывам и пожарам ВМЭО при коротком замыкании, в Центре «Взрывоустойчивость» МГСУ под руководством А.В. Мишуева [1] было предложено в масляном баке разместить воздушную среду в эластичной оболочке (пленке), изолирующей воздух от масла. При сжатии объема воздуха V_v^0 , находящегося в масляном баке под давлением p_0 , до величины $p = p_0 + \Delta p$ объем станет равным

$$V_v = V_v^0 \left(\frac{p_0}{p_0 + \Delta p} \right)^{\frac{1}{\gamma}}, \quad (9.1)$$

где, $\gamma = 1,4$ – коэффициент адиабаты воздуха; $p_0 = p_a + \gamma h = p_a + 0,08$ (атм.), h – глубина погружения воздушного слоя [м].

Объем газовой среды уменьшится на величину $\Delta V_v = V_v^0 - V_v$. Сущность демпферной системы защиты сводится к тому, чтобы высвобождающийся в масляной среде объем ΔV_v был равен объему парогазовой среды (газового пузыря) V_g – при безопасном избыточном давлении Δp , которое целесообразно принимать в пределах $\Delta p = 0,5 \div 1,0$ атм. $\Delta V_v = V_g$. В результате расчетная зависимость для обеспечения взрывоустойчивости ВМЭО принимает вид

$$V_v^0 = \frac{V_g}{1,0 - \left(\frac{p_0}{p_0 + \Delta p} \right)^{\frac{1}{\gamma}}}. \quad (9.2)$$

Если объем газового пузыря V_g был определен при произвольном избыточном давлении $\Delta p'$, то объем V_v^0 , входящий в (10.4) следует определять из соотношения

$$V_g = V_g' \left(\frac{p_0 + \Delta p'}{p_0 + \Delta p} \right)^{\frac{1}{\gamma_g}}, \quad (9.3)$$

где γ_g – коэффициент адиабаты газопаровоздушной смеси (газового пузыря), его величина $\gamma_g = 1,3 \div 1,35$ зависит от состава и температуры газового пузыря.

9.4.2. Метод введения демпфирующего пористого слоя

Объем воздуха V_v^0 удобно и технологично использовать, применяя упругую пористую среду в виде поролона, пенополиуретана и т.п., который будем называть демпфером. Объем пор V_v^0 , как правило, составляет 70–90 % от объема демпфера V_d . Идея заключается в равномерном и технологически удобном размещении на 25–50 % площади вертикальных стенок масляных емкостей, в частности, масляного бака трансформатора демпферного слоя в виде пакетов толщиной от 1,5 до 3,5 см. В качестве демпферного слоя (подушки) используется упругий пористый материал типа поролона или пенополиуретана (рис. 9.24). Демпфирующий материал размещается в пакеты соответствующих размеров, состоящих из двух слоев маслостойкой пленки. Роль второго слоя велика: если один слой обеспечивает нормально допустимую изоляцию, например, в течение одного года, то второй слой этот срок увеличивает минимум в 3–4 раза.

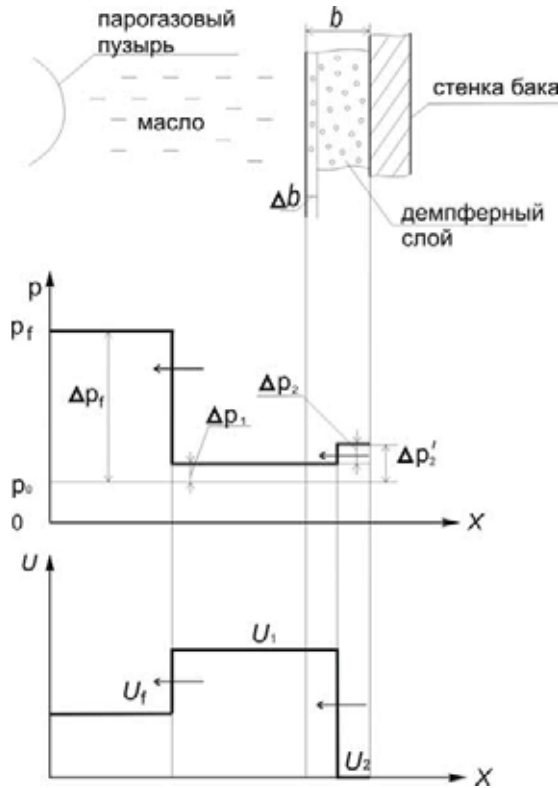


Рис. 9.25. Физическая модель гашения гидравлической волны демпферным слоем

Скорость течения масла за фронтом волны будет

$$U_f = \frac{\Delta p_f}{\rho_m a_m} \quad (9.4)$$

где ρ_m – плотность масла, a_m – скорость звука в масле.

При падении волны на демпферный слой, упругость которого на два порядка меньше, чем масла, образуется волна разрежения, распространяющаяся в обратном направлении (в масляную среду). При этом давление в ней снижается с p_f до p_1 , а скорость течения увеличивается с U_f до U_1 . Чаще всего $U_1 = 2 U_f$. Для определения параметров волны в масле и демпферном слое используем теорию распада произвольного разрыва, ранее использованную для более общего случая – распространения воздушных ударных волн любой интенсивности по каналам переменного сечения и их взаимодействие с пиковыми объектами. Увеличение скорости с U_f до U_1 обуславливает формирование слабой ударной волны (волны сжатия) с давлением $\Delta p_1 = p_1 - p_0$, определяемой по формуле

$$\Delta p_1 = U_1 \rho_d a_d \quad (9.5)$$

индекс «d» – относится к демпферу. Волна разрежения, образующаяся в масляной среде при взаимодействии волны сжатия с демпферным слоем, определяется по формуле:

$$U_1 - U_f = \frac{\Delta p_f - \Delta p_1}{\rho_m a_m} \quad (9.6)$$

Анализ полученных зависимостей показал, что результаты кардинально зависят от соотношения $\rho_m a_m / \rho_d a_d$, который предполагается назвать коэффициентом демпфирования и обозначить $D_f = \rho_m a_m / \rho_d a_d$. Для пористой среды типа пенополиуретана величина D_f лежит в пределах 190÷270. Время пробега волны сжатия по демпферному слою толщиной d составляет доли миллисекунд. Отраженная от стенки волна достигнет границы демпфера с масляной средой через $t'_d = 2t_d$. За это время при падении на демпферный слой волны с $\Delta p_f = 10 \div 20$ атм. сожмется на величину $\Delta b = 2 \cdot U \cdot t'_d$. Для пенополиуретана $\Delta b = 1,0 \div 2,0$ мм. При достижении отраженной от стенки бака волны границы демпферного слоя произойдет взаимодействие этой волны с масляной средой и парогазовым пузырем. После комплекса взаимодействий волн с демпфером, масляной средой и парогазовым пузырем установится режим близкий к квазистатическому. Он характеризуется равенством высвободившегося объема при сжатии демпферного слоя объему газового пузыря. На рис 9.3 представлен характер кривых изменения давления во времени t на стенке бака и в парогазовом пузыре. Характер сжатия во времени t демпферного слоя (высвобождение свободного объема для снижения нагрузок на стенки бака) ΔV_d представлен на рис. 9.5. Изменение давления в парогазовом пузыре p_g в зависимости от его V объема подчиняется политропическому закону $p_g \cdot V_g^n = const$, $n=1,32 \div 1,36$ коэффициент политропы.

Характеристики демпфера (его толщину и площадь) следует подбирать так, чтобы давление p_b обеспечивало безопасные нагрузки в масляном баке ($p_b - p_0 = \Delta p_b \approx 0,5 \div 0,7$ атм. При этом выполняется фундаментальное соотношение $\Delta V_d = V_g$ – объем при безопасном давлении. $\Delta V_d = \Delta b_{\Delta p_b} \cdot \omega$, где $\Delta b_{\Delta p_b}$ – сжатие демпферного слоя при безопасном давлении Δp_b , ω – суммарная площадь демпферного покрытия стенок масляного бака ($\omega = 0,30-0,6 \omega_{st}$, где ω_{st} – общая поверхность стенок бака). На рис. 9.27 представлен график изменения избыточного давления на стенке бака при подходе на стенку волны с пиковым давлением $\Delta p_f = 5$ кг/см², что при отражении от стенки увеличит давление до $\Delta p_{otr} = 2\Delta p_f = 10$ кг/см² (кривая 1 на рис. 9.26). В случае размещения на стенке демпфера давление резко снижается (кривая 2 на рис. 9.26).

Полученные в результате предварительной серии экспериментальных исследований данные позволяют надеяться на перспективы внедрения демпферной системы защиты ВМЭО.

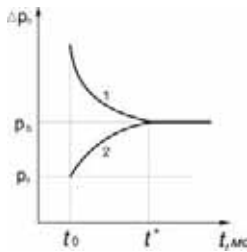


Рис. 9.26. Изменение давления во времени t в парогазовом пузыре (1) и на стенке бака (2): t_0 – время подхода гидравлической волны к демпферному слою, t^* – время достижения квазистатичности (постоянного давления) в баке

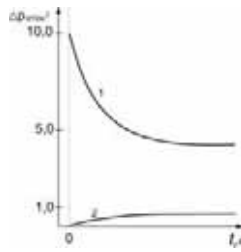


Рис. 9.27. Изменение избыточного давления на стенке бака при подходе на стенку волны: 1 – изменения избыточного давления на стенке бака без демпфера; 2 – изменения избыточного давления на стенке бака с использованием демпфера

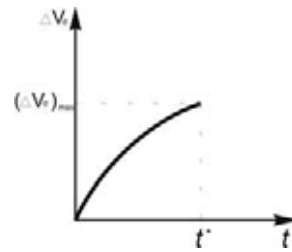


Рис. 9.28. Сжатие во времени t демпферного слоя (высвобождение свободного объема для снижения нагрузок на стенку бака) ΔV_d : $(\Delta V_d)_{\max}$ – соответствует объему парогазового пузыря при безопасном давлении Δp_b

Преимущества демпферной системы защиты ВМЭО следующие:

- надежная защита от взрыва и пожара объекта при коротком замыкании;
- малая стоимость (на порядок ниже) по сравнению получившей распространение французской системы «SERGI»;
- отсутствие вибрации масляного бака при коротком замыкании;
- возможность обеспечить максимальные нагрузки в масляном баке, не превышающие избыточное давление $\Delta p = 0,5 \div 0,7$ атм.;
- заметное снижение толщины стенок масляного бака в связи со снижением нагрузок и обеспечением квазистатичности режима нагружения стенок, что приведет к снижению стоимости ВМЭО.

9.4.3. Снижение нагрузок на корпус при использовании демпферных слоев с различными характеристиками

Многообразие физико-химических процессов при аварийных ситуациях на высоковольтном маслонаполненном электрооборудовании требует изучения этих процессов в упрощенных экспериментальных схемах с тем, чтобы выявить основные закономерности.

Для этой цели было разработано несколько вариантов установок [2], на которых в одномерном приближении можно исследовать взаимодействие волн в жидкой среде с корпусом маслонаполненного электрооборудования (например, баком трансформатора) при взрывном выделении энергии. Генерация «взрывных» волн над поверхностью жидкости в ударных трубах производилась различными способами: при помощи разряда высоковольтного конденсатора, пневмовзрыва при разрыве диафрагмы, отделяющей отсек с высоким давлением от остальной части установки, взрыва горючей газовой смеси и комбинированного взрыва с использованием электрического разряда и взрыва различных концентраций воздуха с горючим газом (в основном кислородно-водородной смесью – КВС).

Таблица 9.3. Реализованные параметры волн в ударных трубах

Испытательный стенд	Нагрузочный импульс		Источник взрывной волны и его энергия
	Амплитуда Δp , атм.	Длительность, ΔT , мс	
A1	1,5...2 2,5	0,5...1 0,8	Электровзрыв, 1,8 кДж Электровзрыв (1,8 кДж) + взрыв КВС в смеси 0,75 воздуха и 0,25 КВС (8 кДж) Электровзрыв (1,8 кДж) + взрыв КВС в смеси 0,5 воздуха и 0,5 КВС (15 кДж) Электровзрыв (1,8 кДж) + взрыв чистой КВС (27 кДж)
	12	5...7	
	20...40	5	
A2	4	3	Пневмовзрыв 25 атм.
B1	0,5...1,8	3	Пневмовзрыв 25 атм.
B2	12...15	5...6	Электровзрыв (1,8 кДж) + взрыв чистой КВС (52 кДж)
B	15...20	1	Электровзрыв (1,8 кДж) в воде. Электровзрыв (1,8 кДж) и взрыв пороха
	120...125	3,5	

На стенде В исследовались также волны, вызванные электрическим разрядом непосредственно в жидкости. Реализованы следующие параметры волн, воздействующих на поверхность столба воды в ударных трубах (таблица 9.3). При увеличении емкости батареи конденсаторов и давления горючей смеси возможно существенное увеличение амплитуд и длительности волн давления в жидкости.

Характерной особенностью использованных экспериментальных установок является генерирование газовой среды, объем которой, отнесенный к единице поверхности рабочей части (ударной трубы), в десятки раз превосходит объем (также отнесенный к единице поверхности масляного бака) парогазовой среды (пузыря), образующегося при коротком замыкании на реальном объекте. Удельный объем V_g / ω :

$$\left(\frac{V_g}{\omega}\right)_{\text{exp}} = (10...40) \left(\frac{V_g}{\omega}\right)_{\text{real}}.$$

Это не сказывается на гашении фронта волны (пикового давления) и плавном характере повышения нагрузки, но проявляется на повышенном давлении в конце процесса.

На осциллограммах давлений в ударной трубе стендов максимальное давление много больше безопасного: $\Delta p_{\text{max}} \gg \Delta p_{\text{bez.}} = 0,7...1,0$ атм. Однако при использовании на реальных объектах характеристики разработанного демпфера обеспечивают безопасные нагрузки даже при незначительной толщине демпферного слоя (1...3 см) и его сжатии на 10...30 %. В опытах же демпферный слой сжимался в 8...10 раз.

Пусть в трансформаторе с емкостью масляного бака 30 м^3 суммарная внутренняя поверхность имеет площадь $\omega_b = 57 \text{ м}^2$ произошло короткое замыкание. При этом в окрестности очага короткого замыкания образовался парогазовый пузырь, объем которого при безопасном давлении $V_g = 70 \text{ л}$. Для обеспечения безопасного давления ($\Delta p_{bez.} = 0,7 \text{ атм}$) необходимо подобрать такой демпфер, который при незначительном сжатии высвободил бы объем $\Delta V_d = V_g$. Расположим на четырех вертикальных стенках бака площадью 38 м^2 демпферный слой толщиной $b = 2 \text{ см}$ и площадью $\omega_d = 0,5 \omega_b = 0,5 \cdot 57 = 28,5 \text{ м}^2$. При сжатии демпфера всего лишь на 10% , т.е. $\Delta b = 0,1b = 0,1 \cdot 2 \text{ см} = 0,2 \text{ см} = 2 \text{ мм}$ высвобождается объем $\Delta V_d = \omega_d \Delta b = 28,5 \text{ м}^2 \cdot 0,002 \text{ м} = 57 \text{ л}$. При этом $\Delta V_d < V_g$ ($57 < 70$). Чтобы обеспечить равенство и обеспечить безопасные нагрузки $\Delta V_d = V_g$ необходимо, чтобы демпферный слой сжался не на 2 мм , а на $2 \cdot 70/57 \approx 2,5 \text{ мм}$, т.е. сжатие демпфера должно быть всего лишь на $12,5 \%$.

Основные результаты исследований волновых процессов и нагрузок на стендах следующие:

- наблюдается усиление волн давления на торцевую заглушку в основании столба воды, при бесконтактном с поверхностью воды «взрыве» до 4 раз, при контактном «взрыве» – вдвое;

- при взаимодействии волн сжатия и разрежения возможны кавитационные процессы, приводящие как к появлению пиков давления, так и к разрывам жидкости, что в высоковольтном маслonaполненном оборудовании может привести к нарушению межвитковой изоляции и усугублению аварийной ситуации.

В дальнейших испытаниях определялось влияние демпфирующих устройств, размещенных в основании столба жидкости, на волновую картину и механические нагрузки на торцевую заглушку. Демпфирующие устройства представляют собою пластину из эластичного пористого материала. В качестве демпфирующих устройств испытаны пластины из различных материалов, отличающихся плотностью, упругостью, размерами воздушных пузырьков, гигроскопичностью. Диаметр пластин изменялся от 30 до 80 мм , толщина от 3 до 45 мм . На торцевой заглушке, на которой закреплялся демпфер, были установлены три пьезоэлектрических высокочастотных датчика. Идентичность сигналов с датчиков в каждом испытании служила гарантией достоверности измеренных параметров «взрывной» волны в основании столба жидкости. Давление во «взрывной» волне без демпфера в основании столба жидкости изменялось от нескольких атмосфер до десятков атмосфер, а длительность импульса изменялась от долей миллисекунд до миллисекунд, в зависимости от применяемых стенов и условий испытаний. Результаты испытаний иллюстрируют рис. 9.29–9.31. Анализ экспериментальных результатов показал, что применение демпферов из пластины поролонa, помещенной в полиэтиленовый водонепроницаемый пакет для уменьшения эффекта гигроскопичности, и пенополиуретана (в полиэтиленовый пакет не помещался) уничтожают высокочастотную составляющую импульса давления на заглушке в диапазоне длительностей импульса давления до 5 мс , тем самым уменьшая давление на фронте «взрывной» волны.

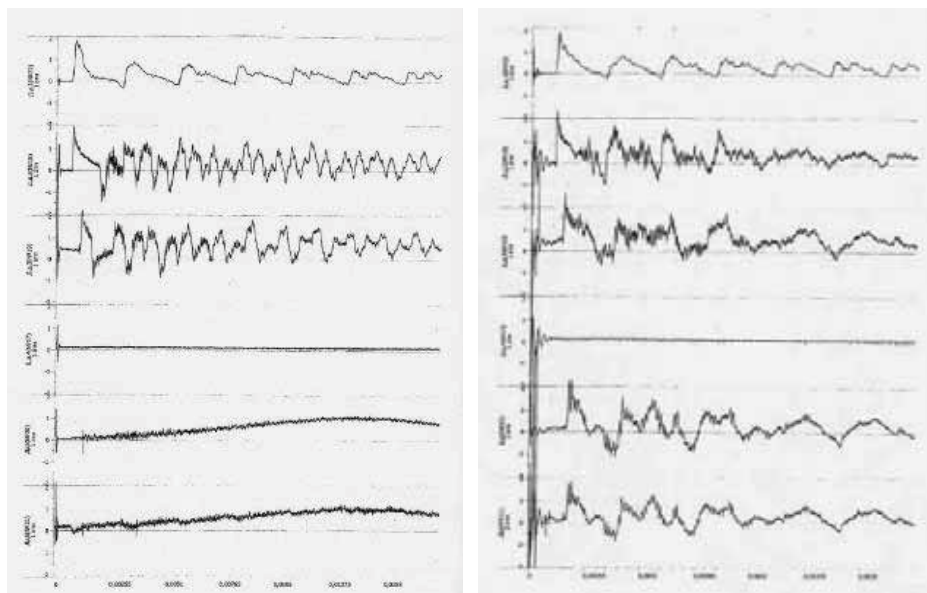


Рис. 9.29. Осциллограммы давлений в ударной трубе стенда А1 при «электровзрыве» над водным объемом. На заглушке демпфер отсутствует

На рис. 9.29 показаны волновые картины давления в ударной трубе стенда В1. Большая длительность импульса воздушно-взрывной волны позволяет рассматривать колебания в столбе жидкости без эффектов их модуляции короткими воздушными импульсами, как в случае испытаний на стенде А1.

Сравним осциллограммы давления в этом случае (большая длительность импульса) при отсутствии демпфера на заглушке ударной трубы и наличии его: пенополиуретан диаметром 35 мм толщиной 9 мм; пенополиуретан диаметром 50 мм и толщиной 9 мм. При отсутствии демпфера наблюдаются крутые импульсы давления с амплитудой 4 атм и частотой 300 Гц. Наличие демпфера диаметром 35 мм и толщиной 9 мм приводит к снижению амплитуды давления до 2 атм. и формирует уже одиночные импульсы с частотой до 70 Гц (рис. 10.29). Демпфер той же толщины, но с большим диаметром (50 мм) еще больше снижает амплитуду давления (до 1 атм.), и формирует также одиночные импульсы с еще меньшей частотой (70 Гц) (рис. 9.29). Таким образом, пенополиуретановый демпфер диаметром 35 мм снижает максимальное давление вдвое, а демпфер диаметром 50 мм – вчетверо. В верхней части столба жидкости (датчики 2 и 3) частота колебаний наоборот увеличивается. Это явление объясняется следующим. В отсутствие демпфера пришедшая к заглушке волна сжатия, определяющая фронт давления, отражается от заглушки также в виде волны сжатия, которая при выходе на поверхность столба жидкости отражается в виде волны разрежения и компенсирует давление в волне сжатия, на что указывает спад давления в конце импульса. Проиллюстрируем этот процесс x-t диаграммой по результатам исследований, полученных на стенде А1 (рис. 9.32). Длительность импульсов колебания давления в столбе жидкости близка к времени двойного пробега звуковой волны по высоте столба.

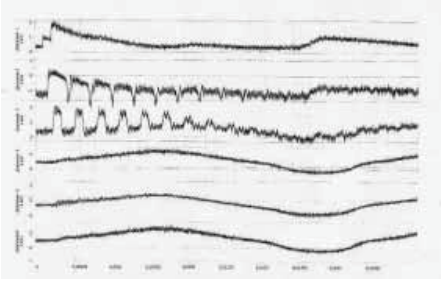


Рис. 9.30. Осциллограммы давлений в ударной трубе стенда Б1. На заглушке пенополиуретановый демпфер $\varnothing 50$ мм, толщиной 9 мм

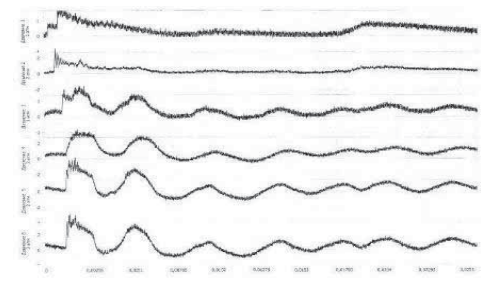


Рис. 9.31. Осциллограммы давлений в ударной трубе стенда Б1. На заглушке демпфер отсутствует (давление 1, 2, 3, 4, 5, 6 – показания датчиков Дд1÷Дд6 на рис. П2.2)

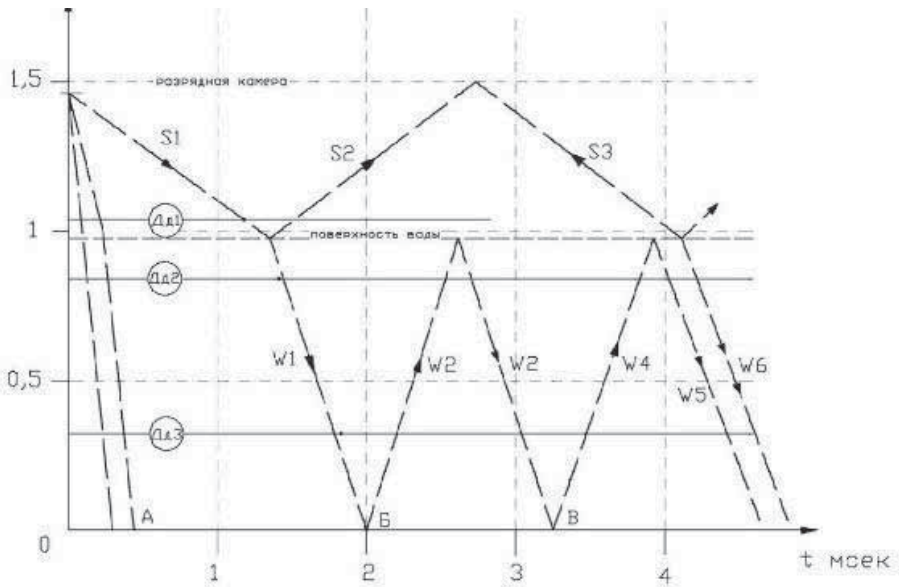


Рис. 9.32. x-t диаграмма волн в ударной трубе стенда А1. S1–S3, W1, W2 – ударные волны, W3–W5 – волны разрежения

При наличии демпфера волна сжатия, подошедшая к заглушке, мгновенно компенсируется волной разрежения из-за изменения объема демпфера и вверх от заглушки движется волна разрежения, которая при отражении от поверхности столба жидкости возвращается в виде волны сжатия. Далее процесс повторяется, пока не упадет давление в воздушной взрывной волне. Длительность импульсов колебания давления в столбе жидкости в этом случае равна времени одиночного пробега звуковой волны по высоте столба. В дальнейшем высвобождение энергии демпфера проявляется в виде низкочастотного импульса давления (импульс разгрузки) с амплитудой, меньшей амплитуды давления в отсутствие демпфера. Следу-

ет ожидать, что эффективность конкретного демпфера должна меняться с изменением амплитуды и длительности «взрывной» волны. Ниже показаны импульсы давления в испытательном отсеке стенда Б2 при амплитуде давления «взрывной» волны 15 атм. над поверхностью столба жидкости. Видно, что при отсутствии демпфера давление на заглушке достигает 30 атм.

При наличии демпфера из пенополиуретана диаметром 50 мм, толщиной 9 мм амплитуда давления в импульсе разгрузки на заглушке снизилась до 20 атм. Эффективность демпфирования как отношение амплитуды давления Δp на заглушке без демпфера к амплитуде давления Δp_d (в импульсе разгрузки) с демпфером, составляющая в данном случае (для сильной «взрывной» волны) $M = \Delta p / \Delta p_d = 30/20 = 1,5$ ниже, чем для «взрывной» волны с амплитудой давления 1,7 атм., где $M = 4$. Демпфер диаметром 50 мм, толщиной 18 мм дает $M = \Delta p / \Delta p_d = 30/12 = 2,5$. Демпфер диаметром 50 мм, толщиной 27 мм дает $M = \Delta p / \Delta p_d = 30/10 = 3,0$. Видна тенденция повышения эффективности пенополиуретанового демпфера с увеличением его объема за счет толщины. Результаты проведенных испытаний сведены в таблицу 9.4.

Таблица 9.4. Результаты испытаний волновых процессов в жидкости с использованием демпферов

Испытательный стенд	Нагрузочный импульс		Демпфер			Параметры демпфированного импульса			Источник энергии
	$\Delta p_{\text{нагр}}$, атм	$T_{\text{нагр}}$, мс	материал	\varnothing , см	h , см	$T_{\text{дмф}}$, мс	$\Delta p_{\text{нач}}$, атм.	$\Delta p_{\text{кон}}$, атм.	
А1	1,7	0,7	-	-	-	-	~ 4	-	ЭР, 1,8 кДж
	1,9	0,8	Пор	5	2	> 10	~ 0	1	
	2	~ 0,7	ППУ	5	0,9	> 10	~ 0	0,5	
	20...40	~ 5	-	-	-	-	60...70	-	ЭР, 1,8 кДж + КВС, 20...30 кДж
40	~ 5	ППУ	5	0,9	~ 2,7	~ 2	10		
Б1	1,8	~ 5	-	-	-	-	-	~ 4	Воздух $\Delta P = 25$ атм.
	1,7	~ 5	ППУ	3,5	0,9	~ 2,5	~ 0,5	2	
	1,9	~ 5	ППУ	5	0,9	~ 7	~ 0,2	1	
Б2	15	~ 3	-	-	-	-	~ 30	-	ЭР, 1,8 кДж + КВС, 25 кДж
	12	~ 3	ППУ	5	0,9	~ 2,4	~ 1	10	
	15	~ 3	ППУ	5	1,8	~ 4,2	~ 1	10	
	14	~ 3	ППУ	5	2,7	~ 5,6	~ 1	8	

$\Delta p_{\text{нагр}}$ – избыточное давление нагрузки; $T_{\text{нагр}}$ – время воздействия нагрузки; h – толщина демпфера; $T_{\text{дмф}}$ – время работы демпфера; $\Delta p_{\text{нач}}$ – начальное избыточное давление демпфированного импульса; $\Delta p_{\text{кон}}$ – конечное избыточное давление демпфированного импульса.

В следующей серии экспериментов на стенде В при импульсном электрическом разряде в вершине столба жидкости были испытаны еще несколько материалов демпферов. Из эластичных сжимаемых материалов,

кроме поролона и пенополиуретана, результаты испытаний которых на других стендах приведены выше, на стенде В были испытаны: пенополиэтилен – диск диаметром 76 мм, толщиной 8 мм, пористая резина – диск диаметром 76 мм, толщиной 8 мм, упаковочная полиэтиленовая пленка с воздушными пузырьками – лист диаметром 76 мм и двойной лист этой же пленки. Исходное давление на днище, содержащее «кумулятивный» пик около 40 атм. от дифракционной волны на боковом патрубке и колоколообразный импульс амплитудой 15...20 атм, полностью демпфируется пенополиуретановым демпфером, остатки не превышают 1...2 атм. (осциллограммы не приведены). Пенополиэтилен и пористая резина обладают несколько худшими демпфирующими свойствами по сравнению с пенополиуретаном. Еще более худшими демпфирующими свойствами обладает упаковочная полиэтиленовая плёнка. Сжатие воздушных пузырьков и последующее высвобождение энергии сжатия проявляется как смещение во времени колоколообразного импульса.

9.4.4. Эффективность демпферов при малых интенсивностях ударных волн

Разрушение электрического изоляционного материала производит интенсивное локальное разложение масла. Это разложение – одна из главных причин, по которой в начале короткого замыкания в условиях высокого давления образуется кратковременный газовый пузырь. Затем, в течение миллисекунд после появления электрической дуги, происходит образование газа, заканчивающееся резким подъемом давления.

Принципиальная схема установки и принцип ее работы.

На установке в масле генерируется дуга миллисекундной длительности при токе ~1 кА. В трансформаторном масле зажигание дуги производится подрывом тонкой проволоочки диаметром 0.06 мм и длиной 5 мм. Зажигание дуги происходит за счет термоэлектронной эмиссии, возникающей при высокой температуре испарения проволоочки ~6000 К, а также высоковольтного импульса, образующегося при обрыве тока. В качестве материала проволоочки был выбран вольфрам, обладающий необходимой температурой испарения, при которой идет значительная термоэлектронная эмиссия.

На проволоочку подается напряжение 5–15 кВ от взрывного высокоиндуктивного комплекса. Полная электрическая энергия комплекса регулируется в пределах 1 – 6 кДж.

Время горения дуги задается декрементом затухания контура, который определяется параметрами контура L , C , и R в каждый момент времени, а также напряжением повторного зажигания дуги. Через каждые полпериода затухающих колебаний ток проходит через ноль. Происходит гашение дуги, и через время $t = L/R_n$, где R_n – сопротивление газа после погасания дуги (очень велико), происходит восстановление полного напряжения на промежутке и повторное зажигание. Это видно по высокочастотным помехам на осциллограммах тока вблизи нуля. Время составляет величину порядка 1 мкс, что много меньше времени горения дуги в течение полупериода колебаний и им можно пренебречь. Дуга перестает повторно возникать, как только напряжение на промежутке ста-

нет меньше напряжения ее зажигания. Этим определяется полное время ее горения. Сопротивление дуги и напряжение повторного зажигания в свою очередь определяется ее длиной. При длине проволоочки 5 мм время горения дуги составляет 4–8 мс.

В эксперименте с чистым маслом время горения дуги составляет 4 мс. Однако в эксперименте масло загрязняется углеродом и металлической взвесью, которые образуются при разложении масла и эрозии электродов, тем самым снижая электрическую прочность масла, а значит и напряжение повторного зажигания и сопротивления дуги. В этом случае время горения составляет 6–8 мс.



Рис. 9.35. Установка для взрыва проволоочки импульсом электрического тока: 1 – разрядник РГУ-1, 2 – высоковольтный конденсатор 54 мкФ 15 кВ, 3 – высоковольтный источник питания ИВН-3



Рис. 9.36. Внутренний вид взрывной камеры. 1 – датчик давления РСВ 109С11, установленный на дне камеры, 2 – демпфирующий пористый материал, закрывает второй датчик давления РСВ 109С11, расположенный центрально – симметрично первому на внутреннем диаметре дна камеры

Кабели от катушки индуктивности идут во взрывную камеру, в которой на днище расположены датчики динамической составляющей давления (с максимальным измеряемым давлением в импульсе до 5000 атм.). Взрывная камера помещается в защитный кожух, представляющий собой бочку из пластика, обклеенную металлической фольгой для предотвращения электрических наводок на приборы во время взрыва проволоочки. Для предотвращения возгорания масла во время взрыва бочка каждый раз наполнялась углекислым газом и закрывалась полиэтиленом и экранированной крышкой.

На рис. 9.36 показана взрывная камера из нержавеющей стали, внутренним диаметром 110 мм, глубиной 120 мм, толщиной стенок 10 мм, помещенная в защитный кожух. В камеру залито трансформаторное масло ТКП. Справа видны подводящие силовые провода с проволочкой. Из взрывной камеры от датчиков сигнал поступает на запоминающий осциллограф GDS 2104, где обрабатывается и расшифровывается (рис. 9.37).

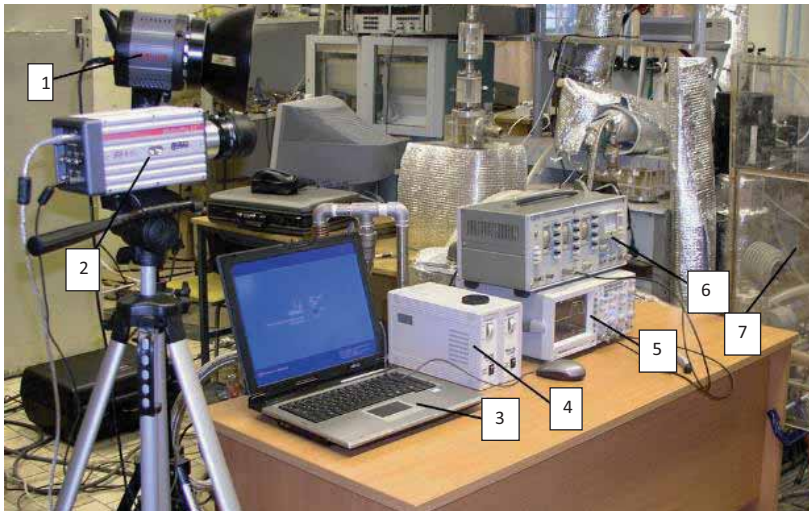


Рис. 9.37. 1 – осветитель, 2 – цифровая скоростная видеокамера Motion Pro X-3 (Red Lake US), 3 – ноутбук, 4 – зарядный усилитель РСВ, 5 – 4-канальный цифровой осциллограф GDS-2104, 6 – генератор прямоугольных импульсов Г5–54, 7 – защитное оргстекло

Для визуализации быстропротекающих процессов используется высокоскоростная цифровая кинокамера (рис. 9.37). Для разработки методов защиты трансформаторов на лабораторных стендах в МФТИ проводились исследования воздействия взрыва на стенки взрывной камеры, наполненной маслом, без защиты и с защитой с использованием различных пористых материалов. Нами было найдено оригинальное техническое решение: дуга, инициированная взрывом проволоочки. Время взрыва составило порядка нескольких миллисекунд, мощность взрыва при этом существенно снижается и процесс моделирования можно производить в лабораторных условиях без дополнительных мер предосторожности. На рис. 9.38 показана характерная осциллограмма электрического тока, проходящего через электрическую дугу при взрыве проволоочки в трансформаторном масле.

Далее представлены результаты исследований процесса взрыва проволоочки в трансформаторном масле во взрывной камере без защиты и с защитой приемных датчиков. Подрываемая проволоочка располагалась на расстоянии 60 мм от дна взрывной камеры. Для защиты использовались образцы из пористых полимеров с различающимися размерами пор – крупнопористый материал – образец № 1 и мелкопористый материал – образец № 2. Характерные размеры пор для первого образца составляют менее 0,5 мм. В экспериментах использовались испытательные образцы (пенополиуретан, плотность 35 кг/м³, пористость около 95 %; пенофол, предельная нагрузка при сжатии не менее 0,035 Мпа, плотность 44 кг/м³, пористость 0,95. Результаты испытаний в виде осциллограмм, показывающих изменение давления в условных единицах от времени воздействия взрыва.

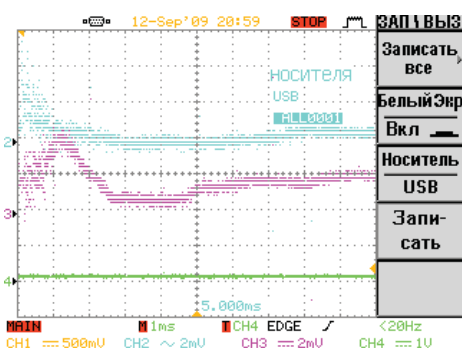


Рис. 9.38. Осциллограмма со скоростью развертки 1 мс/дел, закрытый датчик показывает нижняя кривая, открытый – верхняя кривая. Использовался образец № 1

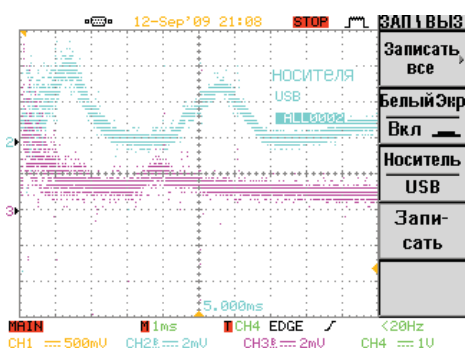


Рис. 9.39. Осциллограмма с измененными местами каналами датчиков, нижняя кривая показывает открытый датчик, верхняя кривая – закрытый, образец №1 (1 мс/дел)

Заключение

В данном разделе описана созданная на базе силового разрядного комплекса установка для моделирования ударно волнового воздействия на стенки трансформатора. Исследованы процессы объемной детонации при распылении щелочных металлов с целью моделирования взрыва трансформатора. Исследованы процессы пробоя, образования пузыря при наличии пузырьков в трансформаторном масле и без них. На основе проведенных исследований на малогабаритных лабораторных стендах разработана методика проведения испытаний в натурных условиях с использованием образцов заряда объемного взрыва на основе щелочных металлов с целью разработки методов защиты стенок трансформаторов. Показано, что эффективность защиты в сильной степени зависит от структуры пористого материала и его основы. Результаты измерений показывают существенное демпфирование импульса на торец стенки взрывной камеры и сглаживание импульсов давления при использовании различных демпферных материалов.

9.5. ДИНАМИЧЕСКИЕ ВЗРЫВНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ДЕМПФИРУЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ ОТ ОБЛАСТИ МАЛЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ДО РАЗРУШЕНИЯ

Известно, что пористые металлы способны поглощать значительную энергию в процессе деформации. Низкая плотность и высокие энергопоглощающие характеристики пористого алюминия позволяют использовать этот материал в качестве жертвенного материала при организации защиты от различных импульсных воздействиях (например, для поглощения энергии взрыва при бронировании военной техники [41].

Представляется возможным использовать пористый алюминий для решения проблемы механического разрушения маслонаполненных автотранс-

форматоров при авариях в электрических сетях. При этом, из-за аварийного энерговыделения в объеме трансформатора возникает импульс давления, который разрушает его корпус. Один из возможных путей защиты корпуса трансформатора – покрытие его стенки изнутри защитным слоем пористого алюминия.

Для эффективного использования пористого алюминия в качестве демпфирующего материала, необходимо исследовать механизмы его деформации и разрушения импульсом давления, а также определить зависимость деформации от механических напряжений от области малых пластических деформаций до полного разрушения

В работе [41] исследовался пористый алюминий израильского производства с плотностью в диапазоне 0.1–0.375 г/см³, причем зависимость деформации от механических напряжений в условиях ударно-волнового нагружения удалось получить только для алюминия с плотностью 0.1 г/см³. В данной главе описаны результаты динамических испытаний отечественного пористого алюминия производства ОАО «Всероссийский институт лёгких сплавов». Плотность исследуемых образцов варьировалась в диапазоне 0,37–0,62 г/см³. Исходный материал поставлялись в виде листов толщиной около 20 мм, из которых для исследований вырезались образцы необходимых размеров.

9.5.1. Теоретический расчет ударных адиабат пористого алюминия с различной плотностью

Для описания поведения пористого вещества при ударно-волновом нагружении существует целый ряд различных теоретических моделей. Например, в соответствии с [43] ударная адиабата пористого вещества может быть рассчитана по формуле:

$$D(U, k) = \frac{A_1}{k^a} + \left[1 + \frac{b}{k} - \frac{1+b-B_1}{k^a} \right] * U,$$

где для алюминия $a = 2.992$, $b = 1.858$, $A_1 = 5.333$ км/с, $B_1 = 1.356$ км/с. Здесь D – скорость ударной волны, U – массовая скорость вещества за фронтом ударной волны, k – пористость материала ($k = V_{00}/V_0$, где V_{00} и V_0 – удельные объемы пористого и сплошного материала соответственно).

Необходимо заметить, что данная формула справедлива для алюминия со значениями пористости, лежащими в диапазоне $1 \leq k \leq 2.5$. Для вещества с такой плотностью реализуется так называемый «нормальный» ход ударной адиабаты, когда рост давления за фронтом ударной волны сопровождается увеличением плотности вещества за фронтом ударной волны. Однако, в настоящей работе исследовались образцы пористого алюминия с плотностями 0,37–0,6 г/см³, что соответствует значениям пористости $k = 4.5–10.3$; в работе [41] исследовались образцы с плотностями 0.1, 0.21 и 0.37 г/см³, что соответствует значениям пористости $k = 210.1, 12.9$ и 10.3 . При таких плотностях рассмотренный выше подход не применим, так как реализуется так называемый «аномальный» ход ударной адиабаты, когда рост давления

за фронтом ударной волны сопровождается уменьшением плотности вещества за фронтом ударной волны. Расширение вещества за фронтом ударной волны, распространяющейся по сильно пористому веществу, связано с его нагревом до очень высокой температуры [42].

Построить имеющие «аномальный» ход ударные адиабаты сильно пористого вещества можно используя широкодиапазонные уравнения состояния и используя какие-либо дополнительные модельные предположения о механизме схлопывания пор. Простейшей моделью для описания поведения пористого вещества при ударно-волновом нагружении является модель Я.Б. Зельдовича [42]. Ударная адиабата согласно этой модели строится в предположении, что схлопывание пор при сжатии происходит при пренебрежимо малых давлениях. Основанные на данной модели теоретические расчеты ударных адиабат для алюминия с различной плотностью представлены на рис. 9.40. При расчетах использовались уравнения состояния из базы данных ОИВТ РАН (<http://ihed.ras.ru/rusbank>).

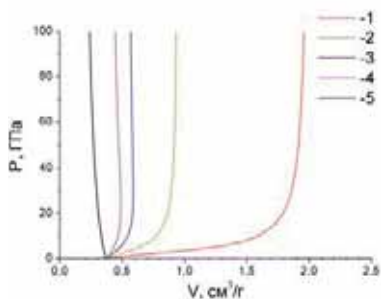


Рис. 9.40. Ударные адиабаты алюминия с плотностью 0.1 (1), 0.21 (2), 0.37 (3), 0.54 (4) и 2.71 г/см³ (5). V – удельный объем вещества за фронтом ударной волны



Рис. 9.41. Экспериментальный стенд «Яшма»

Изложенный выше подход успешно используется для описания ударных волн достаточно большой интенсивности, когда давление за фронтом ударной волны существенно превышает предел текучести материала. Однако в данной работе нас интересует область малых давлений, ограниченная пределом прочности корпуса трансформатора до разрушения – речь идет о сотнях атмосфер. Для описания поведения пористых сред в этой области давлений так же существует ряд моделей [44–48]), однако все они достаточно сложны и требуют знания многочисленных постоянных среды, для определения которых требуется проведение специальных экспериментов.

Таким образом, для определения кривой ударной сжимаемости конкретного пористого материала в области низких давлений целесообразно проведение прямых ударно-волновых экспериментов.

9.5.2. Проведение динамических ударно-волновых испытаний на экспериментальном стенде «Яшма»

Описанные в данном разделе эксперименты были проведены на экспериментальном стенде «Яшма», ударной трубе (УТ) из нержавеющей стали, изготовленной в размерах, позволяющих получить однородный ламинарный поток газа за фронтом падающей ударной волны и сохранить стационарные условия (температуру и давление газа) за отраженной от торца ударной волны не менее 30 мс [49]. Общий вид установки приведен на рис. 9.41. Диаметр ударной трубы – 1000 мм. Длина камеры низкого давления – 10,5 м, камеры высокого давления – 3 м. Камеры разделены мембраной из листовой меди, которая рвалась на крестообразных ножах под действием толкающего газа из камеры высокого давления. Вблизи торца ударной трубы, в измерительной ее части, установлены четыре пьезоэлектрических датчика давления на равных расстояниях друг от друга 150 мм.

Сигналы с датчиков давления записывались на цифровой четырехканальный осциллограф LeCroy 64 Xi (600 МГц – полоса пропускания). Это позволяет измерить скорость ударной волны с точностью до 0,3 % [49].

Установка оснащена системой подачи газа в камеру низкого давления, системой подачи газа в камеру высокого давления, позволяющей работать при давлениях вплоть до 150 атм, и системой измерения давления газов в камерах низкого и высокого давления с точностью не хуже 2 %.

Проведение динамических ударно-волновых испытаний

Методика проведения эксперимента была максимально приближена к методике, описанной в работе [41]. Первоначально в экспериментах использовались цилиндрические образцы с диаметром 80 мм и толщиной 20 мм, имеющие плотность 0,54 г/см³. Образец плотно крепился термостеплом к стальному торцу ударной трубы, после чего торец крепился к ударной трубе.

Осушенный специальным образом газообразный азот заполнял камеру низкого давления под давлением до 10 атм. Толкающим газом во всех экспериментах был водород – он находился в камере высокого давления. Интенсивность генерируемой ударной волны зависела от и толщины медной мембраны, установленной между камерами низкого и высокого давления, и от начального давления и температуры газа в камере низкого давления. Давление водорода в камере высокого давления поднимали до тех пор, пока мембрана не разрезалась крестообразными ножами, расположенными, острые кромки которых находились вблизи плоскости мембраны. После раскрытия мембраны на границе раздела камер высокого и низкого давления происходит распад контактного разрыва, в результате которого порождаются две ударные волны, которые распространяются в противоположные стороны от плоскости мембраны к обоим торцам ударной трубы. В момент прихода ударной волны, распространяющейся в сторону образца, в сечении, где установлен пьезодатчик, на осциллограмме появлялся сигнал. На осциллограммах хорошо виден момент прихода падающей, а затем и отраженной от испытываемого образца ударной волны.

Равновесные параметры за отраженной ударной волной рассчитывались по скорости ударной волны, измеренной на трёх независимых базах. По-

сколькo режимы экспериментов были таковы, что диссоциация, ионизация и другие подобные эффекты, меняющие значительно показатель адиабаты не наблюдаются (равновесная температура за ОУВ не превышала 900 К), для расчетов давления и температуры были применены законы сохранения энергии, импульса, массы и уравнение состояния идеального газа [42, 49].

Механизм разрушения образцов

Первые же эксперименты на экспериментальном стенде «Яшма» показали, что механизм разрушения испытуемого материала при воздействии на него ударной волны, падающей на образец из среды, способной неограниченно менять форму под действием касательных механических напряжений (жидкой или газообразной), принципиально отличается от механизма разрушения при воздействии прочного ударника (например, молота копровой установки). На рис. 9.42 показаны состояния образца испытуемого материала с плотностью 0,54 г/см³, последовательно подвергнутого воздействию ударной волны с нарастающей амплитудой, падающей на него из газовой среды (азот). Максимальное действующее на образец давление в этих экспериментах, получаемое за фронтом отраженной ударной волны, составляло 15, 62 и 92 атмосферы. Какой-либо макроскопической деформации (изменения толщины) образца в опытах зафиксировано не было. На рис. 9.42 видно, что вместо этого разрушение образца происходит путем разрыва стенок отдельных пор на его поверхности с последующим затеканием туда гидродинамического потока. Очевидно, что для поглощения энергии падающей ударной волны такой режим разрушения малоэффективен – необходимо, чтобы имела место макроскопическая деформация образца. Необходимо отметить, что в работе [41] есть упоминание о том, что поверхностный слой образца в экспериментах на ударной трубе прикрывали поливинилхлоридом, но не указано, по какой причине. С целью предотвратить разрушение образца путем разрыва стенок отдельных пор, было принято решение в дальнейших экспериментах защитить поверхность образца слоем листового винипласта ВНЭ толщиной 2 мм.



Рис. 9.42. Образцы винипласта после воздействия ударной волны

Винипласт представляет собой жесткий поливинилхлорид, содержащий смазывающие добавки и стабилизаторы. Обладает отличными физическими свойствами, что позволяет использовать его в качестве конструкционного материала. Материал имеет отличную светостойкость, хорошо склеивается и сваривается. Винипласт листовой изготавливают из непластифицированной поливинилхлоридной композиции методом экструзии или прессовани-

ем. Винипласт листовой ВНЭ изготавливается методом экструзии, листы непрозрачные. Материал не токсичен, нерастворим в этиловом и метиловом спирте, высших алифатических спиртах, алифатических углеводородах, глицерине, смазочных и растительных маслах, не взрывоопасен. При внесении винипласта в открытый огонь, он загорается, однако сразу затухает, если вынести его из пламени. Относят к группе сгораемых материалов, к подгруппе – трудно воспламеняемых. С успехом применяется в промышленности, где используются щёлочи, кислоты и прочие агрессивные соединения и вещества. Основные свойства винипласта ВНЭ приведены в таблице 9.5.

Таблица 9.5. Некоторые свойства винипласта ВНЭ.

Наименование показателя	Ед. измерения	Значение
Рабочая температура (длительно доп.)	град. С	-15 +60
Предел текучести при растяжении	МПа (кгс/см.кв.)	50–59
Относительное удлинение при разрыве	%	10
Температура размягчения по Вика	град. С	86
Твердость по Бринеллю	Мн/м.кв.(кгс/мм.кв.)	150 (15)
Удельная теплоемкость	кДж	1,13–2,14
Коэффициент теплопроводности	Вт	0,15–0,16
Изменение размеров при подогреве, не более	%	5
Электрическая прочность (при 20° С)	МВ/м	15
Диэлектрическая проницаемость	при 50 Гц	4,1

Учитывая все вышеизложенное, винипласт можно рассматривать в качестве возможного материала для облицовки поверхности демпфируемого слоя из алюминия внутри трансформатора.

Результаты динамических ударно-волновых испытаний

В основной серии экспериментов использовались образцы диаметром ~100 мм, поверхность которых была защищена листовым винипластом ВНЭ толщиной 2 мм. Для обеспечения плоскопараллельности торцевых поверхностей образцов перед экспериментом они торцевались на токарном станке.

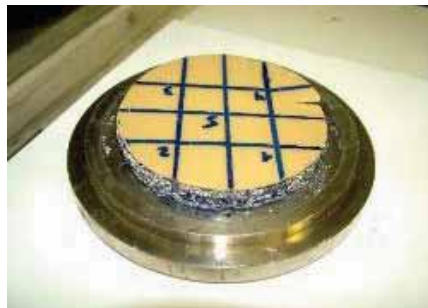


Рис. 9.43. Фотография образца испытываемого материала с плотностью 0,38 г/см³, подвергнутого воздействию ударной волны. Максимальное действующее на образец давление составляло 120 атмосфер. Толщина образца после воздействия уменьшилась почти вдвое

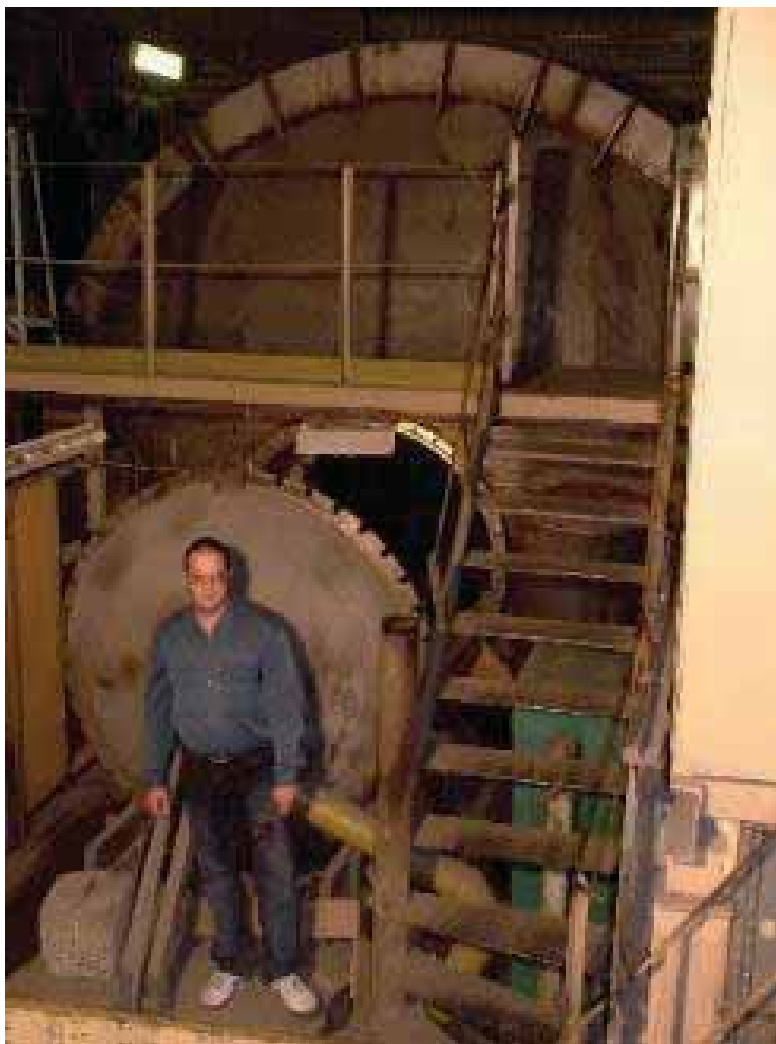


Рис. 9.44. Взрывная барокамера ВБК-2

Время действия максимального давления на образец составляло ~ 30 мс. Характерный вид образца после нагружения приведен на рис. 9.43. После эксперимента образец отделялся от съемного торца ударной трубы путем нагревания вместе с торцом до размягчения термоклея и проводились замеры его геометрических размеров.

Условия испытаний и результаты замера образцов приведены в таблице 9.6. Указана исходная плотность образцов ρ , толщина образцов перед экспериментом h , исходное давление азота в камере низкого давления P_1 , температура T и давление P за фронтом отраженной от образца ударной волны,

среднее уменьшение толщины образца в результате воздействия ударной волны Δh , относительная деформация $\Delta h/h$.

Таблица 9.6 Условия и результаты динамических ударно-волновых испытаний

Образец	ρ , г/см ³	h, мм	Δh , мм	$\Delta h/h$	P_1 , атм	T, K	P, атм
Sr2	0,47	21,2	4,9	0,23	9	640	94,3
Sq3	0,38	22,1	10,3	0,47	7	770	120,3
Sq4	0,37	19,5	9,0	0,46	5	880	116,2
R2	0,59	21,8	0	0	7	770	118.5

9.5.3. Проведение динамических взрывных испытаний на стенде ВБК-2

Для проведения динамических взрывных испытаний использовалась цилиндрическая взрывная барокамера ВБК-2, рассчитанной на подрыв заряда взрывчатого вещества массой до 20 кг в тротиловом эквиваленте. Общий вид барокамеры приведен на рис. 9.44.

Образцы пеноалюминия, поверхность которых была защищена листовым винипластом ВНЭ толщиной 2 мм, размещали на плоском торце массивного недеформируемого цилиндра массой 25 кг перпендикулярно цилиндрическому заряду ВВ. Экспериментальные заряды для взрывного нагружения образцов формировали при заполнении порошком гексогена тонкостенных (0,75–1,0 мм) стеклянных трубок с внутренним диаметром $d \sim 24, 30$ и 36 мм и длиной до 500 мм. Плотность заряда составляла 1,0–1,3 г/см³. Линейное энергосодержание зарядов составляло 2,6–5,8 МДж/м. Заряд инициировался в его верхней части. Расстояние от образца до цилиндрического заряда ВВ устанавливали в интервале 15–30 см. Расширяющиеся продукты детонации набегали на образцы с начальным давлением 100–250 атм. В экспериментах использовались образцы с плотностью свыше 0,5 г/см³, для исследования которых интенсивности ударных волн, реализуемых на экспериментальном стенде «Яшма», оказалось недостаточно. Для высокоскоростной регистрации параметров нагружения в экспериментах использовалась высокоскоростная видеосъемка камерой «Cordin 222–16», позволяющая записать 16 кадров с экспозицией от 5 нс.

Определение скорости детонации D и скорости потока продуктов детонации, падающего на испытуемый образец $U_{\text{пд}}$ осуществляли на основе сопоставления 16 фотографий детонации цилиндрических зарядов, полученных при экспозиции 30–50 нс (рис. 9.45). Моменты открытия затвора камеры регистрировали и определяли с помощью импульсного цифрового осциллографа LeCroy WP 7100A с точностью не хуже ± 1 нс.

На рис. 9.45 приведена иллюстрация методики получения количественных данных из экспериментальных фотографий. При наложении фотографий извлекается информация о скорости и угле падающего на образец потока продуктов детонации и скорости детонации заряда взрывчатого вещества.

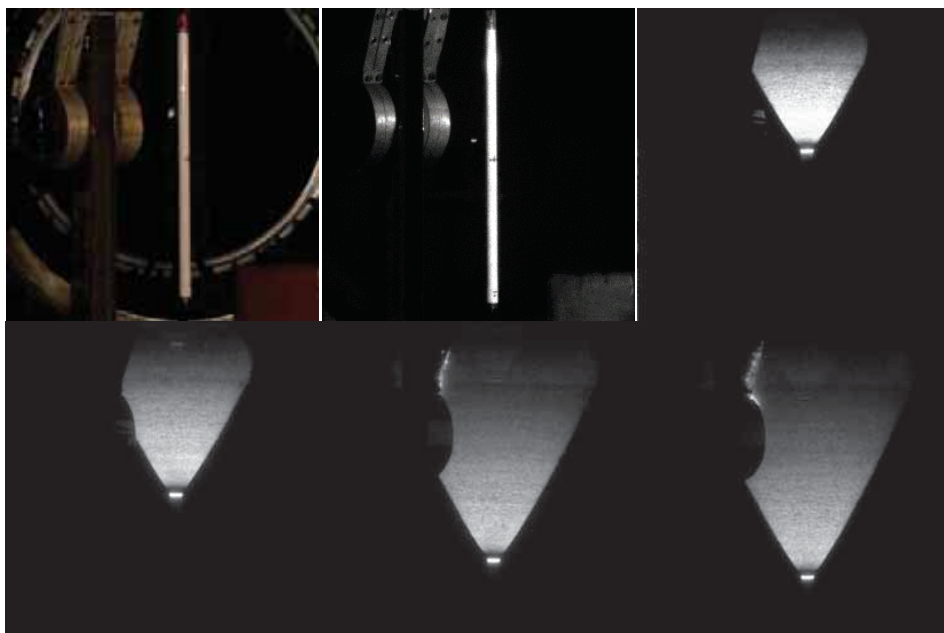


Рис. 9.45. Фотографии эксперимента по ударно-волновому нагружению образца пористого алюминия. Сверху показано исходное расположение заряда относительно образца. Снизу приведены четыре кадра с экспозицией 40 нс, сделанные через 40, 50, 70 и 80 мкс после момента подрыва заряда

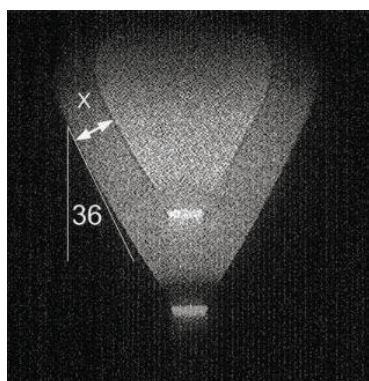


Рис. 9.46. Совмещение двух фотографий потока продуктов детонации, снятых с интервалом 10 мкс. Скорость потока составляет 3.1 км/с. Угол набегания потока на образец составляет 36°

На рис 9.45 и 9.46 приведены иллюстрации изменения давления ударной волны при детонации цилиндрического заряда. Эти данные послужили основой для выбора схемы и параметров экспериментальных испытаний образцов пеноалюминия в диапазоне давлений 100–250 атм.

Результаты динамических взрывных испытаний

В экспериментах на стенде ВБК-2 использовались образцы диаметром ~80 мм, а так же образцы в виде прямоугольного параллелепипеда ~100×100×20 мм, поверхность которых была защищена листовым винипла-

стом ВНЭ толщиной 2 мм. Время действия максимального давления на образец составляло ~50 мкс.

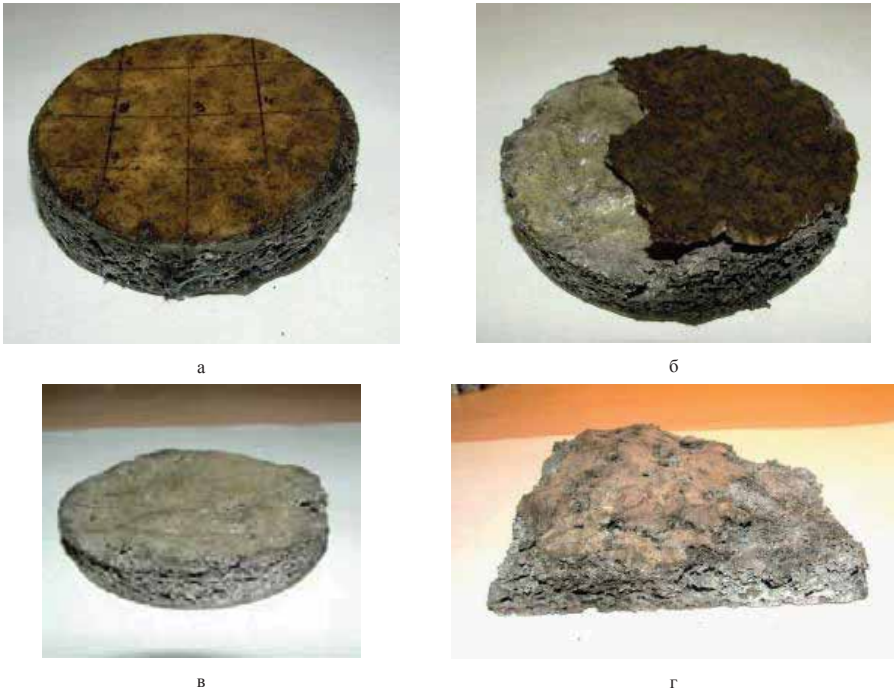


Рис. 9.47. Фотографии образцов пеноалюминия после взрывного нагружения: R2 (а), R3 (б), R12 (в) и Sq1 (г)

После эксперимента проводились замеры геометрических размеров образца. Фотографии образцов после нагружения приведен на рис. 9.47. Видны их частичная деформация и локальные разрушения. Условия взрывных испытаний и результаты замера образцов приведены в таблице 9.7. Указана исходная плотность образцов ρ , толщина образцов перед экспериментом h , среднее уменьшение толщины образца в результате воздействия ударной волны Δh , относительная деформация $\Delta h/h$, диаметр заряда взрывчатого вещества d , его плотность $\rho_{ВВ}$, линейное энергосодержание заряда E_l , расстояние от оси заряда до поверхности образца R , относительное удаление образца от заряда $2R/d$, динамическое давление, действующее на образец P .

Таблица 9.7. Условия и результаты динамических взрывных испытаний

Образец	ρ , г/см ³	h , мм	Δh , мм	$\Delta h/h$	d , м	$\rho_{ВВ}$, кг/м ³	E_l , МДж/м	R , м	$2R/d$	P , атм.
Sq1	0,62	27,53	11,5	0,42	0,0355	1000	5,840	0,255	14,37	221
R3	0,53	22,8	11,6	0,49	0,0245	1153	3,207	0,165	13,47	290
R2	0,59	24,0	4,7	0,19	0,024	1283	3,424	0,230	19,17	160
R12	0,57	21,7	3,8	0,17	0,030	1000	4,170	0,305	20,33	112

Выводы

Результаты динамических испытаний образцов пористого алюминия, выполненных на экспериментальных стендах «Яшма» и ВБК-2, суммированы на рис. 9.42 в сравнении с данными [41]. Экспериментальные данные, полученные на стенде ВБК-2, относятся к образцам с примерно одинаковой плотностью и могут быть аппроксимированы пунктирной линией. Экспериментальных данных, полученных на стенде «Яшма» для образцов с низкими плотностями, недостаточно для выполнения такой аппроксимации ввиду малого количества образцов с низкой плотностью, предоставленных для исследований. Тем не менее, можно предположить, что на поле: относительная деформация образца – ударно-волновое давление, действующее на образец, экспериментальные данные для образцов пористого алюминия с плотностями в диапазоне $0.1\text{--}0.6\text{ г/см}^3$ могут быть аппроксимированы веером прямых линий, расположенных в секторе, ограниченном на рис. 9.48 зеленым пунктиром (0.6 г/см^3) и экспериментальными данными [41] (0.1 г/см^3).

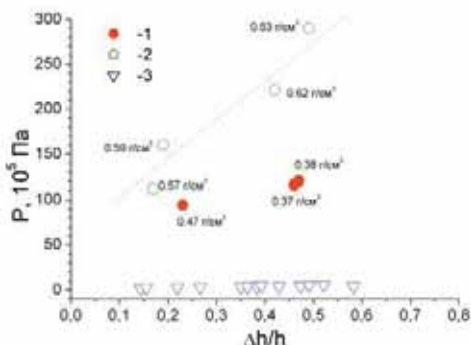


Рис. 9.48. Результаты динамических испытаний образцов пористого алюминия, выполненных на экспериментальных стендах «Яшма» (1) и ВБК-2 (2). По оси абсцисс отложена относительная деформация образца. По оси ординат – ударно-волновое давление, действующее на образец. Около экспериментальных точек указаны плотности соответствующих образцов. Для сравнения приведены результаты [41], полученные на ударной трубе для образцов пористого алюминия с плотностью 0.1 г/см^3 (3)

Анализ проведенных экспериментов и рис. 9.48 позволяют сделать следующие выводы:

1. Для эффективного использования плит из пористого алюминия в качестве материала, поглощающего энергию ударной волны, падающей на него из жидкой или газообразной среды, необходимо дополнительно защищать поверхность этого материала (например, слоем диэлектрика). Винипласт, примененный для этой цели в данной работе, хорошо справляется с ролью защитного слоя в случае однократного воздействия, однако желательно было бы использовать материал, обладающий большей пластичностью. Для выбора и определения эффективной толщины и особенностей использования материала защитного слоя необходимо проведение дополнительных экспериментов.

2. Использование плит из пористого алюминия с плотностью $0,54\text{ г/см}^3$ в качестве материала, поглощающего энергию ударной волны, с точки зре-

ния защиты корпуса трансформатора не эффективно, так как при давлениях, являющихся критическими для корпуса (около 120 атм.) деформация этого материала явно недостаточна. Такой материал может быть рекомендован для защиты от более интенсивных ударно-волновых воздействий (например, в оборонной технике). Для защиты корпусов трансформаторов необходимо использовать алюминиевую пену с плотностью 0.38 г/см^3 и менее. Для определения оптимальной плотности алюминиевой пены необходимо проведение дополнительных экспериментов. Вероятно, она составляет $0.2\text{--}0.3 \text{ г/см}^3$. На основе опыта и результатов, полученных ранее, созданы установки для моделирования и исследования импульсного воздействия на стенки трансформатора при энерговыделении в трансформаторном масле.

9.6. Математическое моделирование воздействия ударной волны на металлическую конструкцию с защитным слоем из пеноалюминия

Математическое моделирование систем с демпферной защитой является важным с точки зрения создания конструкций. Эксперименты ставятся, как правило, для простых геометрий с целью определения конститивных соотношений для различных напряжений, деформации и скоростей деформаций. Расчеты же конкретных конструкций должны производиться численно с помощью коммерческих или самостоятельно разработанных (inhouse) кодов, программ и пакетов. До применения пакетов для конкретных конструкций, необходимо провести численные моделирования для простых трехмерных объектов. По этой причине в данном разделе было проведено изучение воздействия ударной волны на стенки металлического куба с внутренним защитным слоем из пеноалюминия. Воздействие ударной волны на стенки куба изучалось для случая, когда источник волны расположен внутри куба, что соответствует внутреннему взрыву. Для оценки эффективности защиты трансформатора слоем пеноалюминия проведено сравнительное исследование влияния взрывных волн различной интенсивности на стальную пластину с защитой и без защиты. Исследовалась стальная квадратная пластина со стороной 1300 мм и шириной 1000 мм, толщина защитного слоя составляла 50 мм.

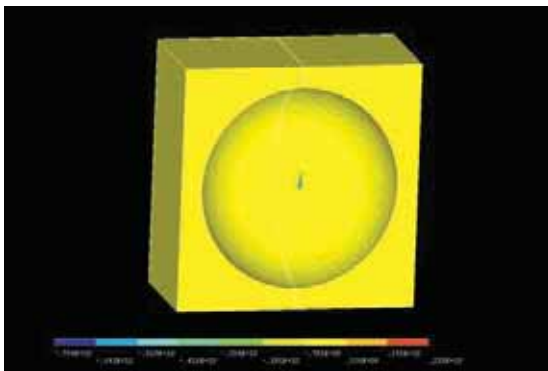


Рис. 9.49. Напряжения в стенках пеноалюминия при его деформировании (кинематическое нагружение, изолированная ячейка)



Рис. 9.50. Стенка со слоем пеноалюминия (размеры $1 \text{ м} \times 1 \text{ м}$)

Кривая деформирования стали с линейным упрочнением представлена на рис. 9.62. Принято, что плотность материала $\rho = 7800 \text{ кг/м}^3$, модуль упругости $E = 200 \text{ ГПа}$, коэффициент Пуассона $\nu = 0.3$, предел текучести $\sigma_T = 300 \text{ МПа}$, касательный модуль $E_\tau = 10 \text{ ГПа}$. В расчетах при знакопеременном упругопластическом деформировании отклик стали моделировался моделью кинематического упругопластического деформирования.

Для описания упругопластического поведения защитного слоя из пеноалюминия применялась нелинейная модель сотового материала, в которой осредненные по представительному объему кривые деформирования $(\bar{\sigma}, \bar{\varepsilon})$ имели вид, представленный на рис. 9.63 для плотности сотового материала $\rho = 300 \text{ кг/м}^3$, принято, что модуль упругости алюминия $E = 72 \text{ ГПа}$, коэффициент Пуассона $\nu = 0.33$, предел текучести $\sigma_T = 145 \text{ МПа}$; предельное относительное изменение объема $V_f = 0.15$.

Сотовый материал рассматривался, как анизотропный с модулями по направлениям

$$E_{ii} = E_{i_{ii}} + \beta(E - E_{i_{ii}}),$$

$$G_{ij} = G_{i_{ju}} + \beta(G - G_{i_{ju}}),$$

здесь i – направление нормали, совпадающее с координатой x_i , индекс ii – обозначает предельное значение осредненного по объему модуля упругости $E_{i_{ii}}$ или модуля сдвига $G_{i_{ju}}$. $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$ – модуль сдвига алюминия;

$$\beta = \max \left[\min \left(\frac{1-V}{1-V_f}, 1 \right), 0 \right],$$

V – относительный объем, отношение текущего объема к начальному.

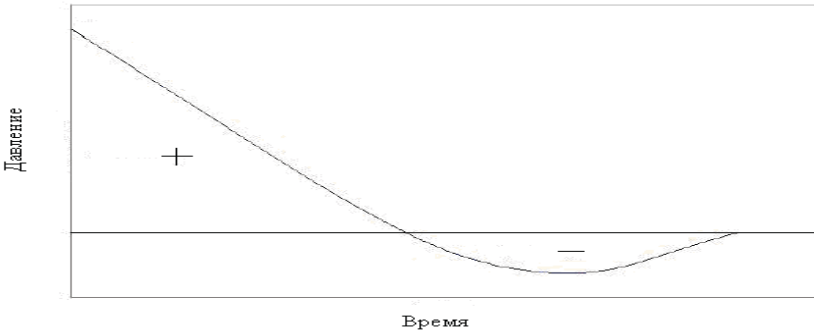


Рис. 9.51. Зависимость давления от времени для ударной волны

Вначале давление скачком возрастает до пикового избыточного давления p_s . Затем давление постепенно убывает, образуется область низкого давления сравнительно не большой амплитуды, после чего давление, в конечном счете, возвращается к атмосферному p_0 за время t_s . Часть кривой, находящаяся ниже нуля – фаза разрежения, а часть, находящаяся выше нуля – положительная фазой. В любой момент времени избыточное давление p_s описывается в безразмерной форме: для параметра a , отвечающего за форму волны и времени продолжительности положительной фазы t_0 , как

$$p(t) = \left(1 - \frac{t}{t_0}\right) p_s, \quad 0 \leq t \leq t_0, \quad p(t) = p_s \left(1 - \frac{t}{t_0}\right) e^{-\alpha \frac{t}{t_0}}, \quad t \geq t_0. \quad (9.7)$$

Для моделирования такого поведения в системе LS-DYNA в качестве нагрузки использовалась модель BLAST_LOAD. Модель BLAST_LOAD основана на представлениях Randers-Pehrson и Bannister (1997). Это удобная модель для прикладывания ударных нагрузок к различным структурам. Эта модель аппроксимирует экспериментальные данные полученные Kingery (1984). В модели учитывается угол падения волны θ , отраженное давление P_{ref} и падающее давление P_{in} .

$$p(t) = p_{ref} \cdot \cos^2 \theta + p_{in} \cdot (1 + \cos^2 \theta - 2 \cos \theta), \quad (9.8)$$

где отраженное давление P_{ref} выражается в терминах коэффициента затухания a и пикового отраженного давления P_{r0} . Падающее давление P_{in} выражается в терминах коэффициента затухания b и пикового падающего давления P_{s0} . Уравнения для положительной фазы продолжительностью t_0 записываются в виде:

$$p_{ref} = p_{r0} \left(1 - \frac{t}{t_0}\right) e^{-a \frac{t}{t_0}}, \quad p_{in} = p_{s0} \left(1 - \frac{t}{t_0}\right) e^{-b \frac{t}{t_0}}. \quad (9.9)$$

Модель BLAST_LOAD требует следующих входных параметров:

- 1) масса-эквивалент массы тринитротолуола (m);
- 2) координаты точки взрыва;
- 3) время задержки между началом расчета и моментом взрыва (τ).

В нашем случае рассматривалась ударная волна, приходящая по нормали к поверхности, то есть $\theta = 0^0$ и уравнение (2) преобразуется к виду:

$$p(t) = p_{ref} + p_{in}. \quad (9.10)$$

В нашем случае, исследовалась зависимость накопленных пластических деформаций в зависимости от массы заряда (прикладываемого давления), с учетом того, что эпицентр взрыва находился на расстоянии 1 м от образца и время запаздывания равнялось $\tau = 0.0001c$. Сравнение результатов проводилось по двум моделям:

- 1) стальная пластинка покрытая слоем пеноалюминия;
- 2) стальная пластинка без защиты.

Результаты моделирования

В таблице 9.8 приведены результаты зависимостей накопленной пластической деформации от массы заряда m , полученные из расчетов двух моделей, на рис. 9.53–9.54 приведены соответствующие графики этих зависимостей.

Таблица 9.8. Накопленные пластические деформации, полученные из расчетов двух моделей при разных массах заряда М

М, кг	ε_p , % (пластинка с защитой)	ε_p , % (пластинка без защиты)
0.3	0.8	2.3
0.5	2	4
0.7	3	7
1.0	5.5	15
1.3	8.5	22
1.5	10.5	27
1.7	12.5	37
2.0	15	46

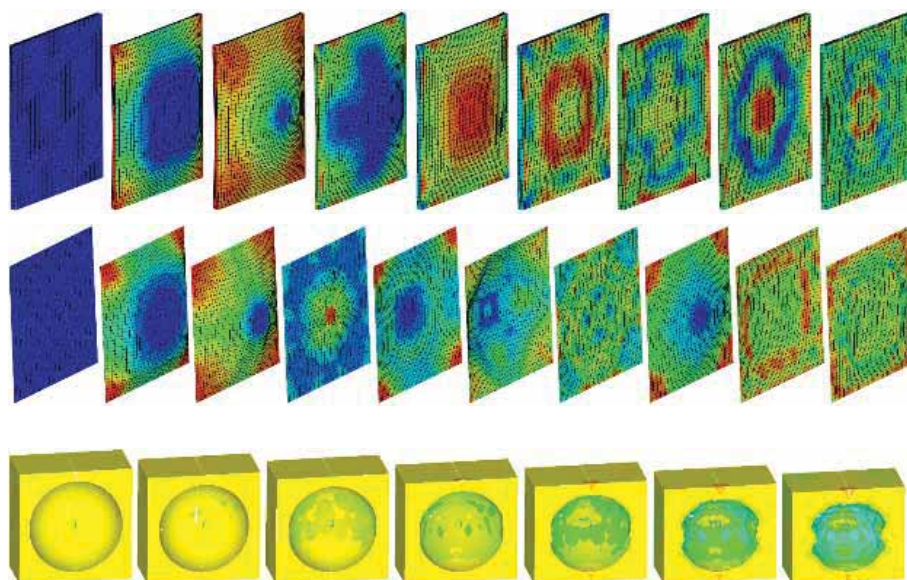


Рис. 9.52. Динамические нагрузки на пластину

Если принять за критерий разрушения стальной пластинки уровень предельных пластических деформаций $\delta = 20\%$, то из полученных результатов видно, что при массе заряда равной $m \approx 1.2$ кг пластинка без защиты разрушается, в то время как пластинка, покрытая слоем пеноалюминия достигает уровня пластических деформаций равног, что ниже предельного значения в 2.5 раза. Динамические нагрузки на пластину приведены на рис. 9.52. На рис. 9.53 приведены графики, показывающие процесс накопления пластических деформаций в зависимости от массы заряда. Как видно из рис. 9.53–9.54, пластинка, защищенная слоем пеноалюминия, может выдержать массу взрывчатки равную $m \approx 2.7$ кг, что в 2.25 раза больше чем для незащищенной пластинки. Значения поглощенной пеной энергии в зависимости от массы заряда приведены на рис. 9.55.

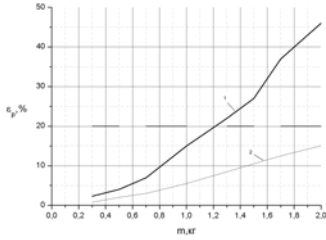


Рис. 9.53. Зависимость накопленной пластической деформации в зависимости от массы заряда: 1 – пластины без защиты, 2 – пластины с защитой

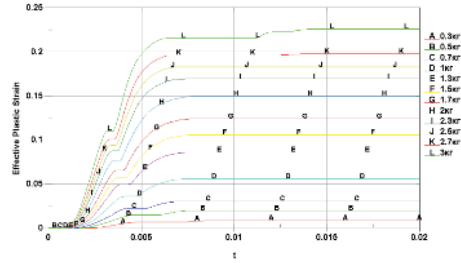


Рис. 9.54. Зависимости процесса накопления пластической деформации от времени при разной массе заряда для пластины, защищенной слоем пеноалюминия

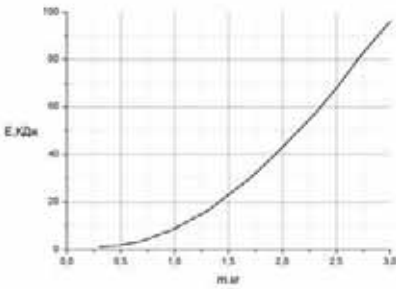


Рис. 9.55. Энергия, поглощенная пеноалюминием в зависимости от массы заряда

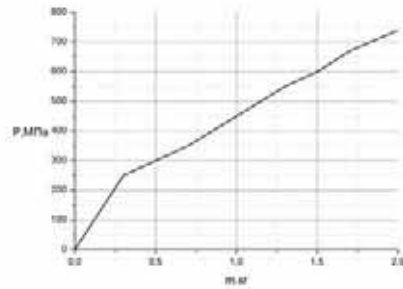


Рис. 9.56. Зависимость максимального давления от массы заряда

Величины максимального действующего давления в зависимости от массы заряда представлены на рис. 9.56. Результаты моделирования представлены на рис. 9.60, а также и содержатся в динамических avi-файлах.

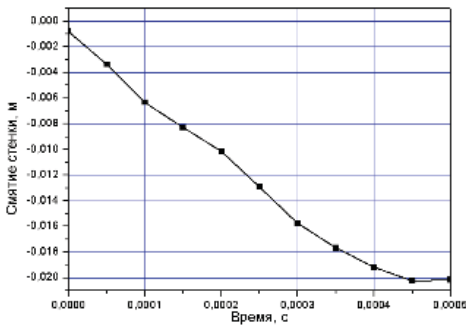


Рис. 9.57. Смятие слоя пеноалюминия

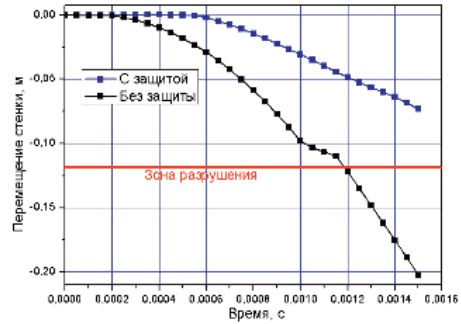


Рис. 9.58. Перемещения центральной точки стальной стенки с защитным слоем из пеноалюминия и без него

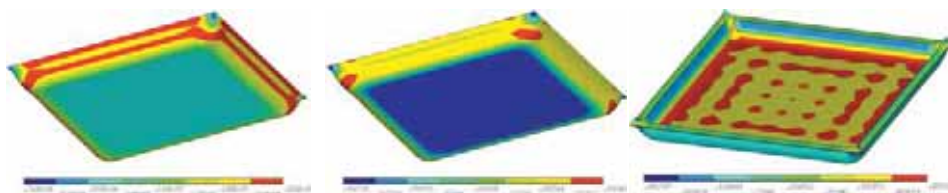


Рис. 9.59. Эквивалентные напряжения в стенке с защитным слоем (вид со стороны стальной пластины и со стороны слоя пеноалюминия)

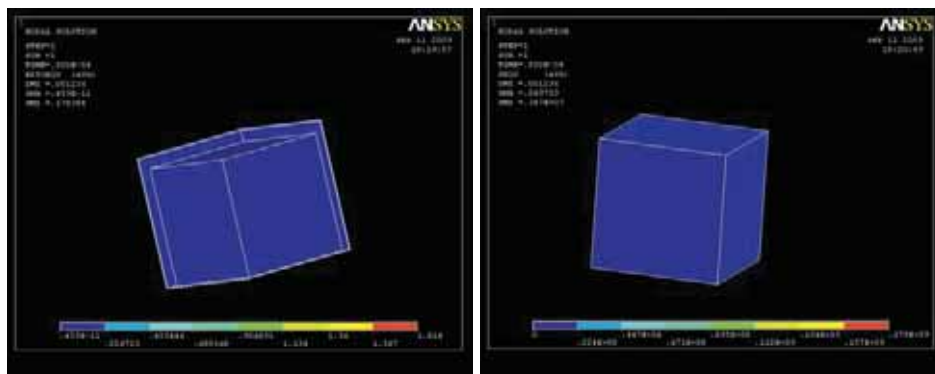


Рис. 9.60. Эквивалентные деформации стенок куба с защитным слоем (вид изнутри куба и внешний вид)

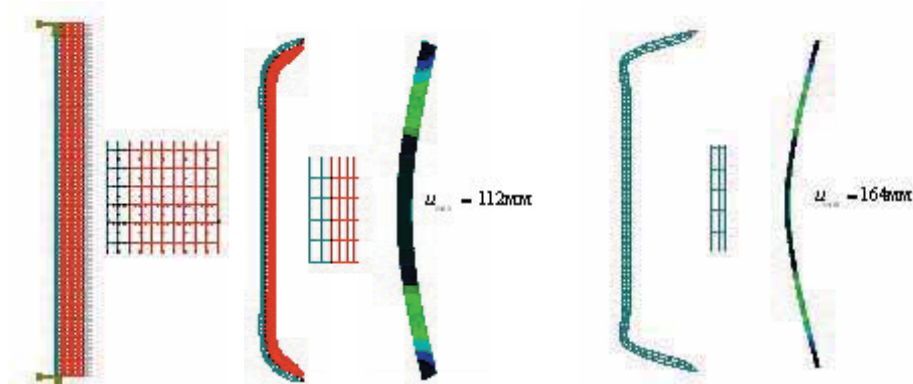


Рис. 9.61. Стенка с защитным слоем: до деформирования, начальная стадия деформирования; и перемещения

В нашем случае, исследовалась зависимость накопленных пластических деформаций от массы заряда (прикладываемого давления), с учетом того, что эпицентр взрыва находился на расстоянии 1 м от образца и время запаздывания равнялось $\tau = 0.0001 \text{c}$. Сравнение результатов проводилось по двум моделям:

- 1) стальная пластинка покрытая слоем пеноалюминия;
- 2) стальная пластинка без защиты.

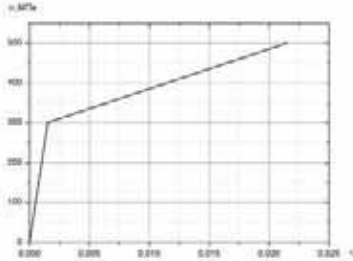


Рис. 9.62. Кривая деформирования стали

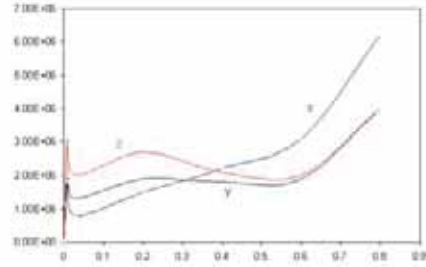


Рис. 9.63. Кривые деформирования
пеноалюминиевого материала

9.7. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ТЕСТИРОВАНИЕ ДЕМПФЕРНОЙ СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ

9.7.1. Описание трансформаторного стенда и диагностики

Макетный образец № 1 взрывобезопасного маслонаполненного авто-трансформатора напряжением 220/110 кВ IV габарита с методами защиты на основе демпфирующих материалов изготовлен совместно с ОАО «ПК ХК Электрозавод». Модель трансформатора, на базе которого разработана конструкция трансформатора с демпферной защитой – ТМП-4000/10. Материалом защитных панелей является пеноалюминий толщиной 20 мм, плотностью 0,2–0,3 г/см³. Демпферными панелями закрыта большая часть боковой поверхности бака трансформатора и крышки с внутренней стороны. Пористость пеноалюминия – закрытая. Демпфирующие панели расположены в зазоре между активной частью трансформатора и корпусом (боковая поверхность, крышка). Крепление панелей к корпусу является простым и удобным для последующей их замены в случае повреждения. Смена панелей должна производиться при снятой крышке трансформатора, без вынимания активной части из бака трансформатора.

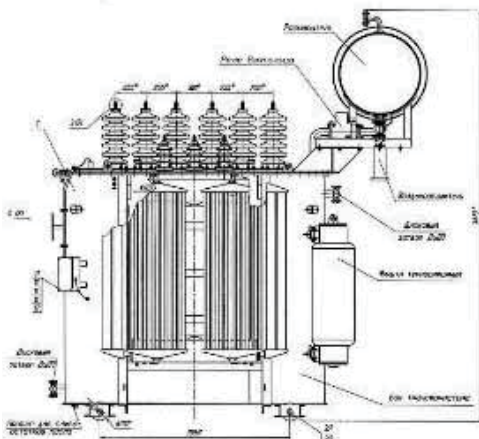


Рис. 9.64. Трансформатор ТМП-4000/10-ХЛ1

Трансформатор оснащен сменной крышкой для испытаний на взрывобезопасность. Сменная крышка имеет ту же конструкцию, что и штатная, за исключением следующих требований: отсутствие штатных трансформаторных вводов высокой и низкой стороны и отверстий для них в крышке, наличие съемной панели для доступа к электродам, наличие датчиков импульсного давления, наличие крановых петель на расширительном бачке, а также высоковольтные разрядники, установленные в проходных изоляторах.

Трансформатор на период испытаний оснащен четырьмя быстродействующими манометрами для регистрации изменений импульсного давления, три из которых расположены в сменной крышке на разном расстоянии от эпицентра распространения ударной волны, и один в стенке бака за демпферной панелью, а также датчиками температуры масла. Пределы измерения давления 0,01...1000 Мпа, время между измерениями, давления 20 мкс. Температура в трансформаторе измеряется в нескольких точках с установленной штатной крышкой. На рис. 10.64 показано продольное вертикальное сечение бака трансформатора. Всего в трансформаторе установлено 16 термодатчиков.

Система электроснабжения. Электрооборудование стенда включает в себя низковольтную и высоковольтную части. Высоковольтная часть электрооборудования стенда состоит из высоковольтного трансформатора, высоковольтного диодного моста, зарядных резисторов, конденсаторной батареи, высоковольтных делителей напряжения, игнитронного разрядника сильноточного фидера. Разряд заряженной батареи на испытываемый образец осуществляется с помощью игнитронов. Для обеспечения механической прочности токопроводящих элементов при воздействии электродинамических сил между проводниками в режиме разряда конденсаторной батареи при подводе высокого напряжения к испытываемому объекту применяется усиленная конструкция электрических шин и фидеров.

Конденсаторная батарея. С целью формирования мощного импульса тока, протекающего через нагрузку, энергия импульса предварительно запасается в накопителе, в качестве которого используется конденсаторная батарея. Батарея собрана из конденсаторов типа К41И-7 емкостью 100 мкФ каждый. Вся батарея состоит из четырех секций, каждая из которых имеет три группы по 92 конденсатора. Всего батарея содержит 1104 конденсатора. Емкость секции $C_{сек} = 0,0276 \text{ Ф}$, а общая емкость батареи $C_6 = 0,11 \text{ Ф}$. Максимальное рабочее напряжение на конденсаторах $U = 5 \text{ кВ}$, при этом запасенная энергия составляет 1,38 МДж. При заряде батареи до напряжения 4,5 кВ энергия, накопленная в конденсаторах, превышает 1 МДж.

На рис. 10.65 представлена фотография фрагмента стеллажа, демонстрирующая особенности конструкции конденсаторной батареи. Конденсаторы размещены на двух одинаковых стеллажах. На каждой из двух сторон стеллажей собрана одна секция батареи, которая состоит из двенадцати рядов по 23 конденсатора, расположенных друг над другом. Конденсаторы уложены в специальные ячейки под небольшим углом к горизонтальной плоскости таким образом, что при нарушении герметичности их корпуса масло, за-

полняющее конденсатор, стекает внутрь стеллажа в специальный поддон, не загрязняя элементы ошиновки. Шины батареи изготовлены из медных стержней длиной 5 м. Каждый конденсатор соединен с парой коллекторных шин гибкими предохранительными проводниками, изготовленными из кабеля РК-75-4-12 со снятой оплеткой. В случае пробоя внутри какого-либо конденсатора гибкий



Рис. 9.65. Стеллажи конденсаторной батареи

предохранитель выгорает, и взрыва конденсатора, вызываемого разрядом на него энергии всей батареи, не происходит. Пары шин составляют три группы, которые через электродинамические предохранители (R5) соединены между собой. Конструкция стеллажа, крепление шин, их диаметр обеспечивают достаточную механическую прочность, так что в случае короткого замыкания разрушение ошиновки батареи исключено. С целью обеспечения электробезопасности при пробое на «землю» изоляторов шин, подводящих напряжение к объекту испытания, дополнительно в качестве шины заземления используется металлический пол из стальных листов толщиной 3 мм. Такая низкоомная и малоиндуктивная шина наряду с ограничивающими ток сопротивлениями из нержавеющей стали является средством электрозащиты и позволяет не устанавливать конденсаторную батарею на изоляторах.

Зарядное устройство. Батарея заряжается до напряжения $U=0\div 5$ кВ от высоковольтного источника, в составе которого трехфазный согласующий трансформатор 380В/220В, трехфазный повышающий трансформатор 220В/6000В и выпрямитель, собранный по схеме Ларионова. Ток заряда ограничивается общим балластным резистором R1 и развязывающими резисторами R2, установленными в каждой секции. Зарядные сопротивления собраны из резисторов ПЭВ-100. Величина сопротивления определяется схемой соединения резисторов.

Разряд конденсаторной батареи. Четыре секции подсоединяются на одну общую нагрузку. Так как запас энергии батареи достаточно велик, каждая секция разряжается через свой ионитронный разрядник И1–И4 на общую нагрузку, где R_n – омическое сопротивление, а L_n – индуктивность нагрузки. Параметры ионитронов «Богатырь» следующие: анодное напряжение – 20 кВ; максимальный коммутируемый ток – 100 кА; количество заряда за импульс – не более 200 Кл; амплитуда тока поджигающего импульса – 300 А; длительность поджигающего импульса – 10 мксек; частота повторения импульсов – не более 10 имп/мин.

С целью обеспечения надежной параллельной работы нескольких ионитронов в цепях разряда устанавливаются дроссели развязки L_p . При отсутствии этих дросселей пробой одного из разрядников приведет к повышению потенциала катодов других ионитронов практически до потенциала батареи, и в результате разность потенциалов анод-катод будет близка к нулю, т.е. пробой остальных разрядников станет невозможен. Установка дросселей развязки позволяет поделить напряжение батареи между нагрузкой и индуктивным сопротивлением дросселя. Таким образом, в случае неодновременного пробоя ионитронов потенциал катодов ионитронов оказывается ниже потенциала батареи на величину падения напряжения на индуктивном сопротивлении дросселя в цепи первого пробившегося ионитрона. Импульсы запуска ионитронов формируются блоками поджига, собранными на базе тиратрона с холодным катодом ТХИ-1200/2,5. Для всех ионитронов используются одинаковые схема поджига, что позволяет взаимозаменять вышедшие из строя блоки. Четыре секции конденсаторной батареи подсоединяются на одну общую нагрузку с помощью коаксиального фидера. Центральный провод фидера изготовлен из медного стержня диаметром 25 мм, а внешний проводник – из медной трубы диаметром 60 мм. Такая конструкция обеспечивает необходимую механическую прочность при малых величинах омического и индуктивного сопротивлений фидера.

Система измерений. Система измерений позволит регистрировать следующие параметры процесса: напряжение на разрядном промежутке, ток разряда, импульсное давление в газовой подушке и на стенке корпуса, механическое напряжение на поверхности бака трансформатора, температуру масла. Для выполнения измерений на стенде предлагается следующая схема, состоящая из 3 независимых систем сбора данных: Модульная система сбора данных «LTR-EU-8–1», собирающая данные с 16 термодатчиков (ТТ41ХК), 10 тензорезисторов (UFLA-5–11), 2 датчиков давления (РСВ109С11) и сигнала напряжения (термодатчики измеряют температуру внутри бака трансформатора, тензорезисторы измеряют механическое напряжение на поверхности бака трансформатора, напряжение на разрядном промежутке измеряется с помощью делителя напряжения, расположенного непосредственно на высоковольтных разрядниках, датчики давления измеряют импульсное давление в режиме реального времени); анализатор спектра AS, принимающий сигналы с 2 датчиков давления PS-02–01 (измеряет импульсное давление в режиме реального времени). Измерение силы тока разряда осуществляется с помощью пояса Роговского.

9.7.2. Численное моделирование взрывных процессов в автотрансформаторе и сравнение с экспериментальными данными

Численное моделирование взрывных процессов проводилось для макетного образца автотрансформатора (рис. 9.64). Характеристики дуги короткого замыкания: энергия 400 кДж, время существования 2 мс.

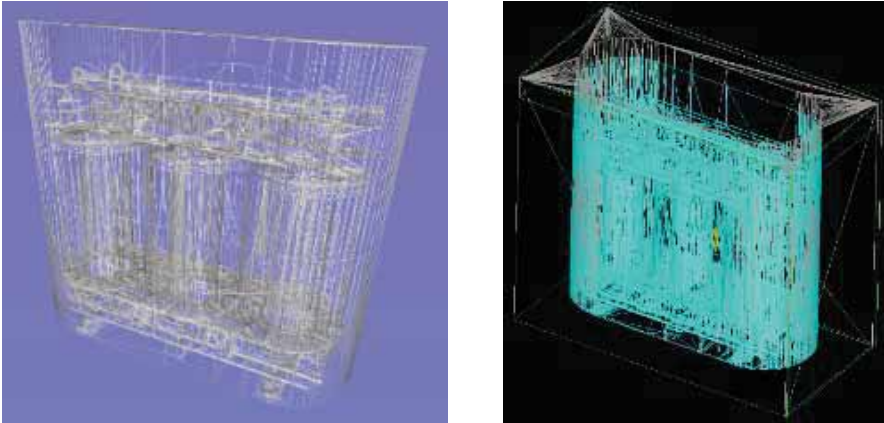


Рис. 9.66. STL модель макетного образца в полупрозрачном и сеточном представлении

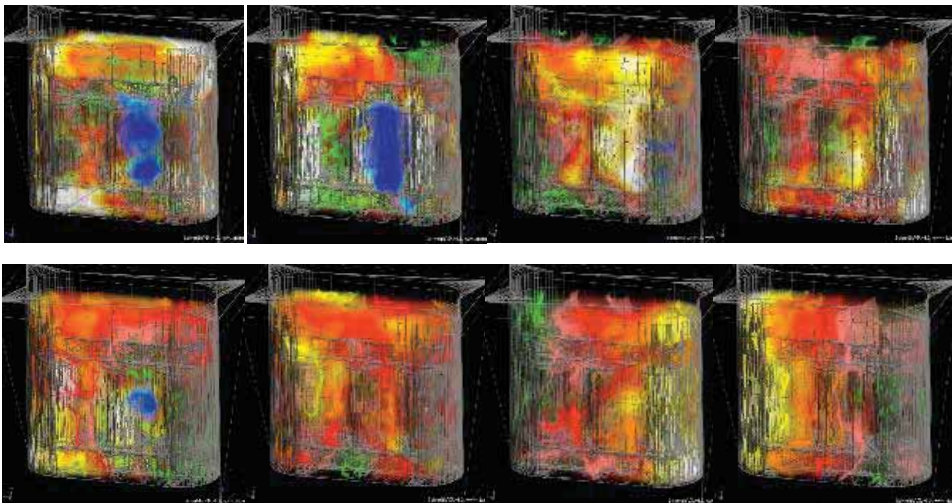


Рис. 9.67. Распределение давления в моменты времени $t = 0,5$ мс, $0,75$ мс, $1,5$ мс, 2 мс.;
 $t = 2,5$ мс, 3 мс, $3,5$ мс, 4 мс

На рис. 9.67 приведено распределение суммарного импульса давления по стенкам трансформатора в различные моменты времени. Следует заметить, что наибольший импульс получает зона, расположенная вблизи от места возникновения дуги, но несколько смещенная по осям y и z . Приведенные результаты показывают, что при данных параметрах дуги максимальный (и наиболее неравномерный) прирост импульса приходится на первые две миллисекунды процесса.

Расчетная область и граничные условия. Расчетная область состоит из пяти подобластей (см. рис. 9.66): а) «Масло», б) «Изолятор», г) «Сталь» (магнитопровод), д) «Медь 1» (обмотка высокого напряжения), е) «Медь 2» обмотка низкого напряжения), ж) «Демпфер». На общих границах подобластей задается сопряженное граничное условие для уравнения энергии. В подобластях «Сталь», «Медь 1», «Медь 2» задается объемное тепловыделение (свой объемный источник тепла), зависящее от условий расчета. Опорные величины в расчете: $T = 273 \text{ }^\circ\text{K}$, $P = 101000 \text{ Па}$. Температура окружающей среды задана $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

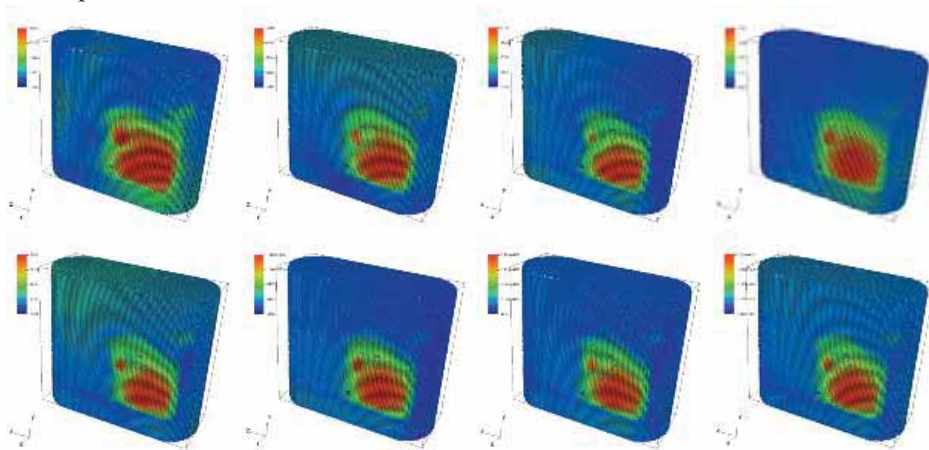


Рис 9.68. Распределение суммарного импульса давления по стенкам, $t=1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8$ мс

В данном разделе приводятся результаты оценочного моделирования влияния пузырьковой защиты на процессы теплообмена в макете автотрансформатора. Приведены условия и результаты расчетов маслаполненного автотрансформатора с установленной модифицированной демпферной защитой в условиях заводских тепловых испытаний и в рабочем режиме.

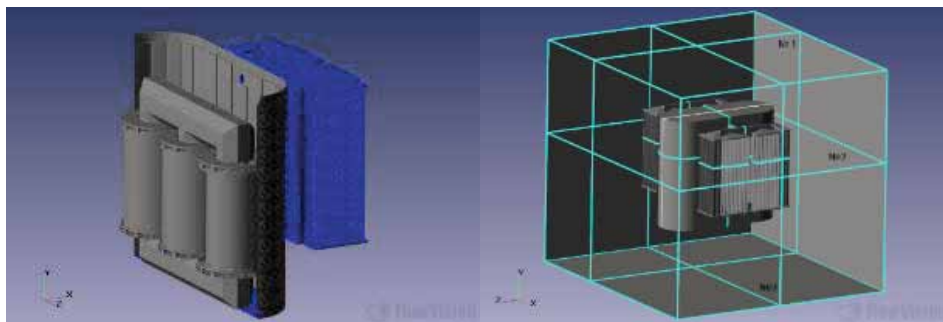


Рис. 9.69. Расчетная область автотрансформатора с новой конструкцией демпферной защиты и сечения расчетной области

Построение сеточной модели. Были проведены расчеты на 3 сеточных моделях – грубой (1384322 ячеек), средней (2820112) и подробной (5698470). В результате было показано, что возможно использовать среднюю (2820112 ячеек) сеточную модель без критической потери точности решения. Сечения расчетной сетки в сечении № 1, № 2, № 3 (см рис. 9.70) представлены на рисунках ниже.

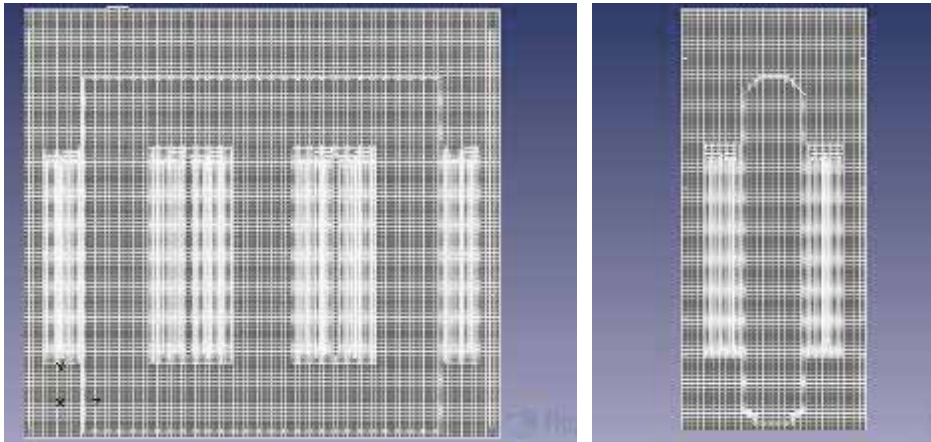


Рис. 9.70. Сеточная модель а) в сечении № 1, б) в сечении № 3

Для более подробных сеточных моделей заданы первый и второй уровень адаптации на всех узких зазорах. При этом второй уровень адаптации позволяет разрешить эти зазоры полностью.

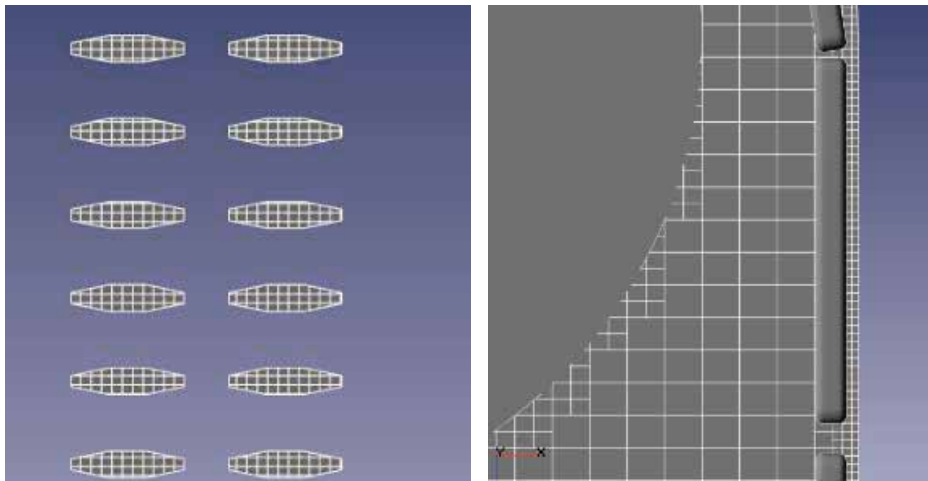


Рис. 9.71. Разрешение зазоров подробной сеточной моделью в области а) радиаторов, б) зазор между пластинами демпферной защиты и стенкой бака

Расчет оптимизированной конструкции в разных режимах работы трансформатора

В данном разделе получены данные по тепловым заводским испытаниям трансформатора. Это позволило провести сравнение построенной модели с реальными данными. Тепловые испытания трансформатора состоят из нескольких этапов:

- 1) испытание холостого хода, когда вторичные обмотки разомкнуты, а к первичной подано номинальное напряжение;
- 2) испытание короткого замыкания, когда вторичные обмотки соединены накоротко и на первичную обмотку подается номинальный ток;
- 3) испытание коротким замыканием эквивалентным током (ток, потери при котором на омическом сопротивлении, равны сумме тепловых потерь в режиме холостого хода и в режиме короткого замыкания).

В первом случае выделения энергии на омической нагрузке в катушке минимально, тогда как потери на вихревых токах и гистерезисе в магнитопроводе максимальны и соответствуют тепловыделению в рабочем режиме. Во втором случае обратная ситуация, магнитное поле невелико, так как нагрузкой служит только сопротивление катушек, а ток равный рабочему приводит к тепловыделениям на омических сопротивлениях катушек соответствующим потерям в рабочем режиме. Таким образом, первые два испытания дают представление о потерях в трансформаторе в работающем режиме. Для моделирования тепловыделений работающего трансформатора, в режиме короткого замыкания, на первичную обмотку подают такое напряжение, чтобы ток соответствовал суммарным потерям в трансформаторе. В результате суммарное тепловыделение в обмотках трансформатора, соответствует суммарным тепловыделениям в обмотках трансформатора и магнитопроводе в рабочем режиме. При этом в режиме короткого замыкания эквивалентным током измеряют температуру верхних слоев масла. То есть если в модели задать тепловыделения в обмотках, соответствующие тепловыделениям при коротком замыкании, то расчетная температура масла в верхней области бака трансформатора должна соответствовать результату испытаний.

Режим короткого замыкания. По результатам испытаний коротким замыканием с током эквивалентным суммарным потерям трансформатора 30,939 кВт (этот ток составил 239,74 А), температура верхних слоев масла составила 58,7 градуса относительно температуры окружающей среды. Результаты моделирования данного эксперимента приведены ниже.

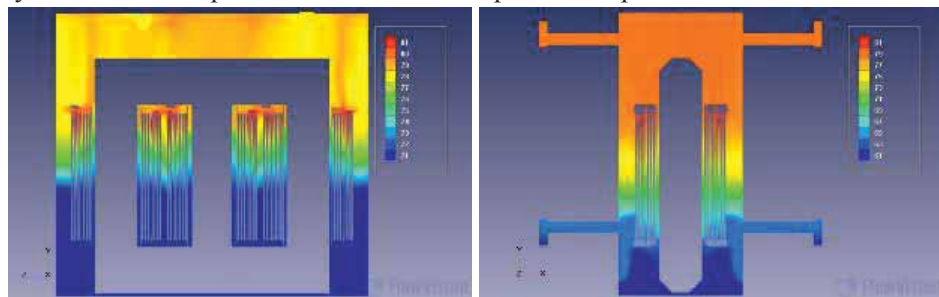


Рис. 9.72. Распределение температуры масла в баке с теплопроводящими стенками в режиме короткого замыкания эквивалентным током: а) сечение № 1, б) сечение № 3

Из приведенных рисунков видно, что температура верхних слоев масла в результате расчета составляет примерно $78,5^{\circ}\text{C}$. Данное значение с хорошей точностью совпадает с реально измеренным значением. Средняя температура масла по всему объему бака составила $72,6^{\circ}\text{C}$. И хотя для полной верификации необходимо провести более подробные измерения, данные результаты говорят о хорошем совпадении расчетной величины с реально измеренной.

Рабочий режим. Распределение температуры в работающем трансформаторе определяется заданием в магнитопроводе тепловыделение, соответствующее потерям холостого хода ($4,9\text{ кВт}$ из данных по тепловым испытаниям), а в катушках снизим тепловыделение до потерь в режиме короткого замыкания номинальным током.

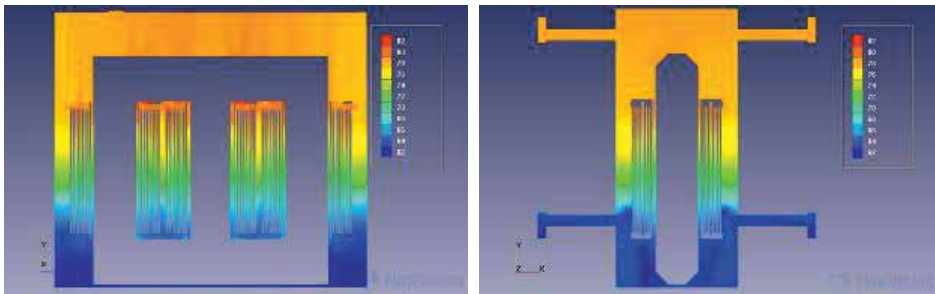


Рис. 9.73. Распределение температуры масла в баке с теплопроводящими стенками в рабочем режиме: а) сечение № 1, б) сечение № 3

Как видим из рисунков, температура верхних слоев масла изменилась не сильно и находится в диапазоне от 78 до 80°C . Однако в рабочем режиме распределение температуры стало более неоднородным из-за тепловыделения в магнитопроводе. Средняя температура в баке составила $72,7^{\circ}\text{C}$, что крайне незначительно отличается от данной величины в режиме короткого замыкания эквивалентным током.

Для того чтобы определить максимально возможный уровень влияния установки демпферной защиты в автотрансформатор, проведем расчет в тех же условиях, но при адиабатической боковой стенке трансформатора.

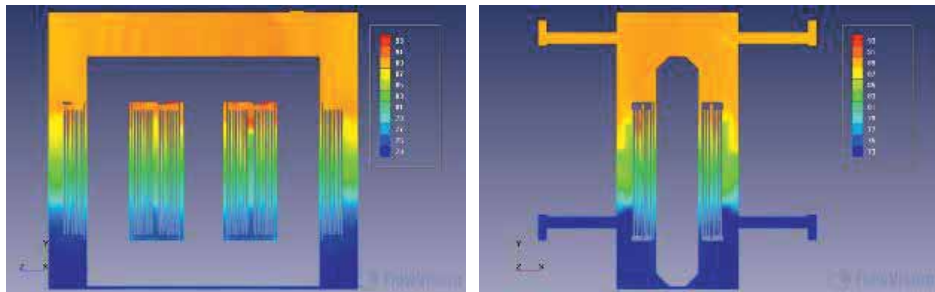


Рис. 9.74. Распределение температуры масла в баке с адиабатическими стенками в рабочем режиме: а) сечение № 1, б) сечение № 3

Температура в верхних слоях бака теперь находится в диапазоне от 89 до 91 °С. Таким образом, температура в верхних слоях увеличилась примерно на 10 °С в случае исключения боковой стенки трансформатора из теплообмена. Средняя температура в баке составила 83,3 °С, то есть на 10,5 °С больше, чем в случае с теплопроводящими стенками. Эти результаты говорят о значительной роли боковой стенки в процессах теплообмена трансформатора. Посмотрим, насколько влияет установка демпферной защиты в бак трансформатора в рабочем режиме. Также оценим, какое влияние оказывает теплопроводность листов, на которых закреплены демпферные пластины, на результирующее распределение температур. Для этого в одном случае в качестве материала для листов зададим теплоизолятор с коэффициентом теплопроводности на два порядка ниже, чем теплопроводность демпферных пластин, а в другом случае материал с сопоставимой теплопроводностью. Результаты расчета приведены ниже.

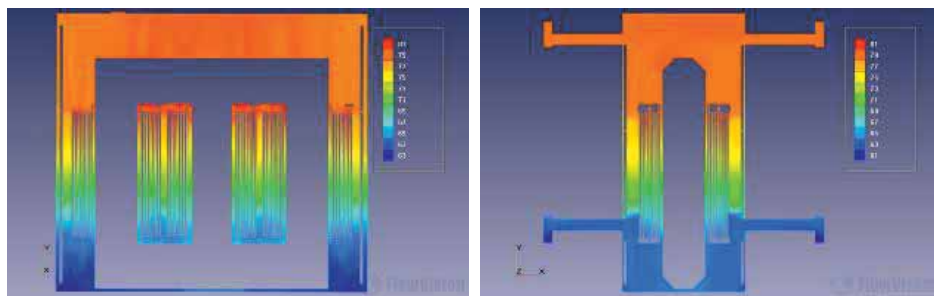


Рис. 9.75. Распределение температуры масла в баке с установленной демпферной защитой на теплоизолирующей основе: а) сечение № 1, б) сечение № 3.

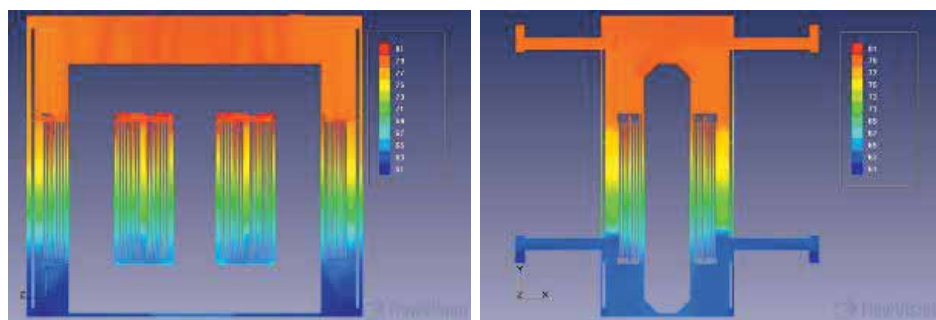


Рис. 9.76. Распределение температуры масла в баке с установленной демпферной защитой на теплопроводящей основе: а) сечение № 1, б) сечение № 3

Из рисунков видно, что отличия температур, при использовании разных материалов подложки для демпферных пластин, практически незаметны. Средняя температура в баке получилась 72,9 °С и 73 °С для случаев с изолирующей и проводящей основами соответственно. Таким образом, можно заключить, что изменение температуры при установке демпферной защиты

в первую очередь определяется тем, как изменяются процессы конвекции, нежели процессы теплопередачи. Отметим, что установка демпферной защиты увеличивает среднюю температуру лишь на 0,1 °С, в то время как полной исключение боковых стенок бака из процессов теплообмена повышает среднюю температуру более чем на 10 °С. Значит, установка демпферной защиты практически не уменьшает мощность теплоотдачи через боковую стенку бака трансформатора.

Режим перегрузки на 10 % по мощности. Рассмотрим, каким образом поведет себя распределение температуры в обычном трансформаторе и трансформаторе с установленной демпферной защитой, в режиме превышения мощностей тепловыделения на 10 % в обмотках и магнитопроводе.

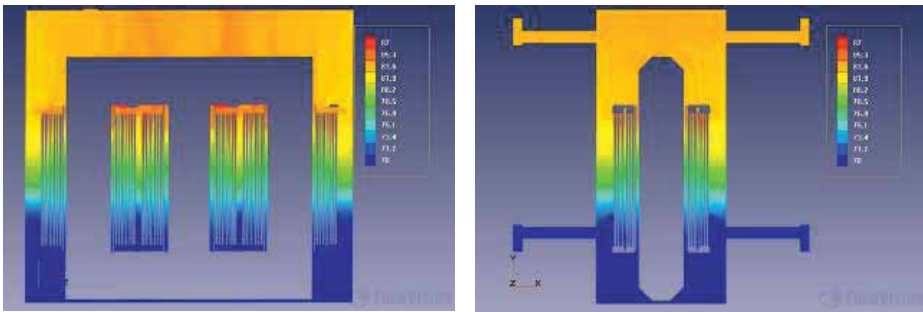


Рис. 9.77. Распределение температуры масла в баке в режиме 10 % перегрузки: а) сечение № 1, б) сечение № 3

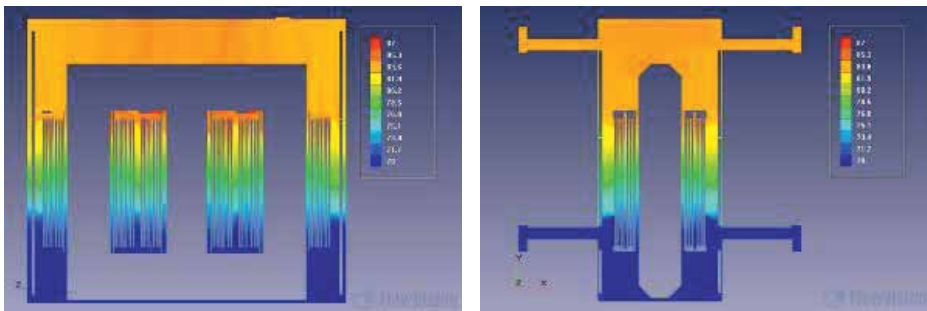


Рис. 9.78. Распределение температуры масла в баке с установленной демпферной защитой в режиме 10 % перегрузки: а) сечение № 1, б) сечение № 3

Средние температуры в баке масла в случае с демпферной защитой и без, составили 78 °С и 77,8 °С. Отметим, что увеличение температуры масла происходит синхронно в обоих случаях.

Выводы

Моделирование тепловых испытаний трансформатора на заводе дало результаты, практически совпадающие с измеренными величинами. Измеренная величина превышения температуры верхних слоев масла над температурой окружающей среды составила 58,7 °С, а рассчитанная примерно 58,5

°C. Влияние различных конфигураций на теплообмен в различных режимах представлено в сводной таблице 9.9.

Таблица 9.9. Превышение средней температуры масла в баке над температурой окружающей среды в различных режимах и при различной конфигурации трансформатора

Режим	Без демпферной защиты	С демпферной защитой (теплоизолирующая подложка)	С демпферной защитой (теплопроводящая подложка)	С адиабатическими стенками
Режим короткого замыкания эквивалентным током	52,6 °C			63,5 °C
Рабочий режим	52,7 °C	52,9 °C	52,8 °C	63,3 °C
Режим перегрузки на 10 %	57,8 °C	58 °C		

Видим, что внесение демпферной защиты увеличивает среднюю температуру масла всего на 0,2 °C. Тогда как полное исключение боковой стенки бака трансформатора из процессов теплообмена повышает температуру масла более чем на 10 °C. То есть, установка демпферной защиты практически не исключает боковые стенки трансформатора из процесса теплообмена с окружающей средой. При этом не важно, теплоизолирующая ли основа, на которой закреплены демпфирующие пластины или теплопроводящая. В режиме перегрузки разница между средней температурой при установленной демпферной защите и не установленной, не изменяется по сравнению с рабочим режимом. Можно заключить, что добавление данной конфигурации демпферной защиты практически не нарушает процесс теплообмена боковой стенки бака автотрансформатора с внешней средой, и поэтому повышение средней температуры в баке для текущей конфигурации трансформатора незначительно.

9.8. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЯ КОНСТРУКЦИИ МАКЕТНЫХ ОБРАЗЦОВ АВТОТРАНСФОРМАТОРА С УЧЕТОМ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ (ANSYS-LS DUNA)

9.8.1. Создание расчетной модели

На основе чертежей конструкции трансформатора в препроцессоре комплекса ANSYS создана трехмерная модель (рис. 9.79), в которую вошли только детали основного корпуса, основания и вставок из пеноалюминия. Для анализа влияния вставок из пеноалюминия созданы два варианта расчетной модели. В первом варианте вставки отсутствовали. Во втором варианте внутри корпуса располагались вставки согласно данным модели.

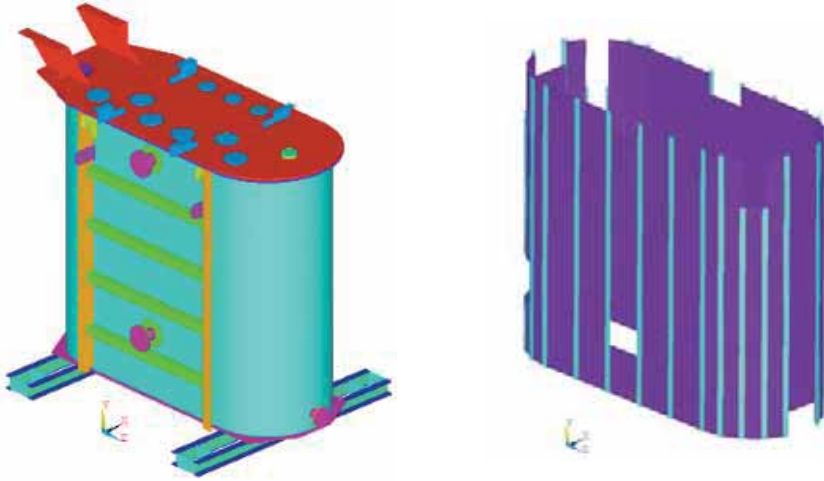


Рис. 9.79. Трехмерная модель трансформатора: а) корпус; б) вставки из пеноалюминия

На основе трехмерной модели созданы два варианта конечно-элементных моделей трансформатора (рис. 9.79). Корпусные детали разбиты на оболочечные элементы с толщинами, соответствующими трехмерной модели. На (рис. 9.79а) представлена такая конечно-элементная модель, на которой разными цветами показаны области с различными заданными толщинами. Вставки из пеноалюминия разбиты на объемные элементы (рис. 9.79б). Первая модель состоит из 101513 оболочечных элементов, а вторая – из 198397 оболочечных и 433935 объемных элементов.

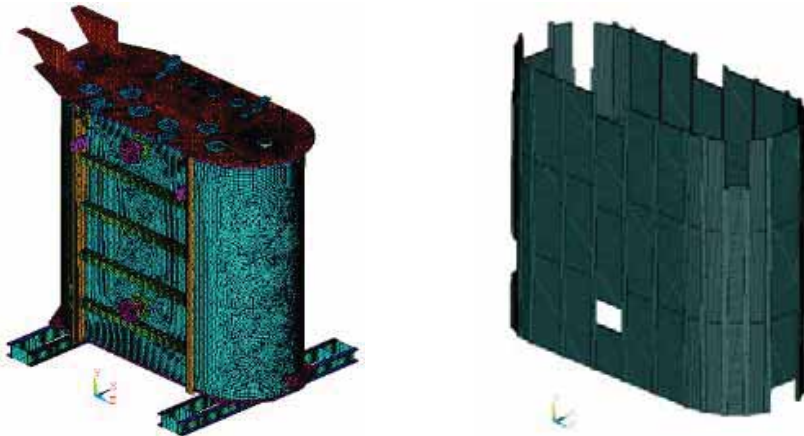


Рис. 9.80. Конечно-элементная модель трансформатора: а) корпус; б) вставки из пеноалюминия

Соединение деталей корпуса между собой осуществлена связью типа *Spotweld*. Эта связь предназначена для моделирования различного типа соединений и, в частности, для соединений типа «сварка» и болтовых соеди-

нений. Имеется возможность задать либо неразрушаемое соединение, либо задать уровень растягивающих и сдвиговых усилий и пластических деформаций, при которых связь разрывается. На (рис. 9.80) показана модель с расположенными связями.



Рис. 9.81 а) Набор элементов для задания давления:
а) корпус; б) вставки из пеноалюминия.



Рис. 9.81 б) Модель
трансформатора с показанными
связями

Задание давления осуществляется на набор элементов, моделирующие замкнутую полость трансформатора (рис. 9.81). В первом варианте без пеноалюминия это элементы, расположенные на вертикальных стенках, верхней крышке и днище корпуса трансформатора (рис. 9.81а). Во втором варианте такие элементы расположены на верхней крышке и днище корпуса трансформатора и по внутренней поверхности вставок из пеноалюминия (рис. 9.81б).

9.8.2. Модель пористого материала

Для того чтобы описать модель пластичности, имитирующую поведение пористого материала, необходимо ввести функцию текучести, определяющую поверхность текучести $\Phi = \hat{\sigma} - Y$, где Y – напряжения течения пористого материала, которые могут быть выражены как [45]

$$Y = \sigma_p + R(\hat{\varepsilon}), \quad (9.11)$$

где $R(\hat{\varepsilon})$ – функция упрочнения, $\hat{\varepsilon}$ – эквивалентная деформация.

Особенностью функции текучести является то, что она включает в себя гидростатическое давление, так как при сжатии материала поры разрушаются и тем самым изменяется его объем. То есть, в отличие от обычного металла, объемные деформации пенометалла могут быть пластическими. Таким образом, функция текучести содержит в себе, как девиаторную часть тензора напряжений $s_{ij} = \sigma_{ij} - \frac{1}{3}\sigma_{kk}\delta_{ij}$, так и шаровую $\sigma_m = \frac{1}{3}\sigma_{kk}$. Попробуем ввести эквивалентные напряжения $\hat{\sigma}$, рассмотрим для начала удельную потенциальную энергию деформации [3].

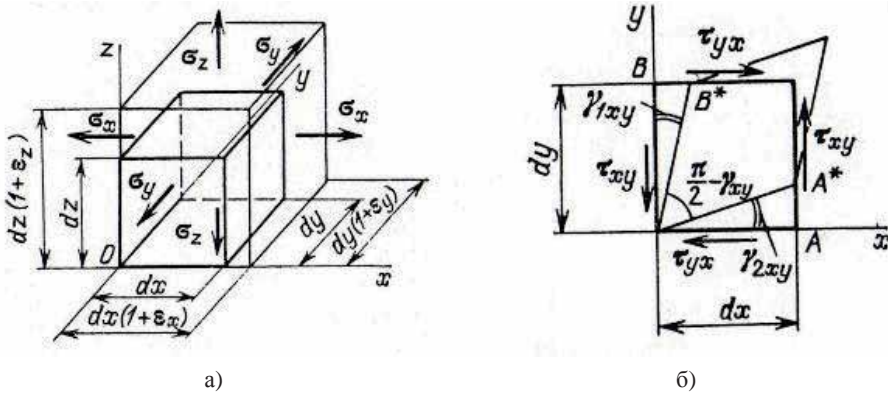


Рис. 9.82. Определение потенциальной энергии

Сначала будем считать, что на элемент тела действуют только нормальные напряжения (Рис. 9.82а). По граням элемента приложены напряжения σ_x , σ_y , σ_z . Изменения этих величин, вызванные приращением координат в пределах элемента, можно не учитывать, так как соблюдаются уравнения равновесия.

Работа внутренних сил упругости в результате деформации будет равна:

$$\begin{aligned} dU &= \frac{1}{2} \sigma_x dydz \cdot \varepsilon_x dx + \frac{1}{2} \sigma_y dx dz \cdot \varepsilon_y dy + \frac{1}{2} \sigma_z dy dx \cdot \varepsilon_z dz = \\ &= \frac{1}{2} (\sigma_x \varepsilon_x + \sigma_y \varepsilon_y + \sigma_z \varepsilon_z) dV, \end{aligned}$$

где $dV = dx dy dz$.

Потенциальная энергия деформации равна

$$U = \iiint_V \frac{1}{2} (\sigma_x \varepsilon_x + \sigma_y \varepsilon_y + \sigma_z \varepsilon_z) dV,$$

а удельная потенциальная энергия деформации:

$$U_1 = \frac{1}{2} (\sigma_x \varepsilon_x + \sigma_y \varepsilon_y + \sigma_z \varepsilon_z).$$

Перейдем к определению удельной потенциальной энергии при деформации сдвига. На (рис. 9.82 б) изображен элемент тела, испытывающий деформацию сдвига в плоскости xy . Первоначально прямой угол между осями x и y после деформации изменяется на величину:

$$\gamma_{xy} = \gamma_{1xy} + \gamma_{2xy}. \quad (9.12)$$

Работа внутренних сил упругости, характеризующихся касательными усилиями на гранях элемента, может быть выражена таким образом:

$$dU = \frac{1}{2} \tau_{xy} dydz \cdot \gamma_{1xy} dx + \frac{1}{2} \tau_{yx} dx dz \cdot \gamma_{2xy} dy.$$

Множитель $1/2$, как и раньше, связан со статическим приложением усилий от нуля до максимальной величины к упругому телу.

Вследствие свойства парности касательных напряжений: $\tau_{xy} = \tau_{yx}$, и с помощью соотношения (6) находим

$$dU = \frac{1}{2} \tau_{xy} \gamma_{xy} dV.$$

Удельная потенциальная энергия деформации при сдвиге в плоскости xu равна:

$$U_e = \frac{1}{2} \tau_{xy} \gamma_{xy}. \quad (9.13)$$

Существенно, что удлинение ребер элемента не влияет на энергию деформации сдвига, так как касательные напряжения не производят работы при деформациях ε_x и ε_y . Соотношения, подобные (9.13), справедливы при сдвиге в других плоскостях.

Объединяя результаты для растяжения и сдвига, получим общую формулу для удельной потенциальной энергии деформации:

$$U_e = \frac{1}{2} (\sigma_x \varepsilon_x + \sigma_y \varepsilon_y + \sigma_z \varepsilon_z + \tau_{xy} \gamma_{xy} + \tau_{yz} \gamma_{yz} + \tau_{zx} \gamma_{zx}).$$

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)], \dots, \gamma_{xy} = \frac{1}{G} \tau_{xy},$$

Для изотропного тела соотношения упругости примут вид:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}.$$

Учитывая, что:

$$U_e = \frac{1}{2E} [\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 - 2\nu(\sigma_x \sigma_y + \sigma_y \sigma_z + \sigma_z \sigma_x) + 2(1+\nu)(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)]. \quad (9.14)$$

Внося соотношения (9.14) в формулу (9.13), получим после несложных преобразований:

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)}.$$

Воспользуемся формулой для интенсивности напряжений:

Выражая из (15) сумму квадратов касательных напряжений и подставляя в (10722), учитывая, что $(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)^2 = 9\sigma_m^2$, получим:

$$U_e = \frac{(1+\nu)}{3E} \left[\sigma_i^2 + \frac{9(1-2\nu)}{2(1+\nu)} \sigma_m^2 \right], \quad (9.15)$$

где

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{3}{2} s_{ij} s_{ij}}, \sigma_m = \frac{1}{3} tr(\sigma_{ij}), s_{ij} = \sigma_{ij} - \sigma_m \delta_{ij}. \quad (9.16)$$

Введем параметр $\alpha^2 = \frac{9(1-2\nu)}{2(1+\nu)}$, который будет отвечать за форму поверхности текучести, тогда:

$$U_e = \frac{1}{2E} \left(\frac{1}{1 + \left(\frac{\alpha}{3}\right)^2} \right) \left[\sigma_i^2 + \alpha^2 \sigma_m^2 \right]. \quad (9.17)$$

Удельная потенциальная энергия в случае одноосного растяжения образца будет равна:

$$U_e = \frac{1}{2E} \sigma^2.$$

В случае одноосного растяжения образца пластические деформации возникают, когда эквивалентное напряжение равно $\hat{\sigma} = \sigma$, из этого следует:

$$\hat{\sigma} = \sqrt{2EU_e}.$$

Отсюда получаем [1]:

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{1 + (\alpha/3)^2} \left[\sigma_i^2 + \alpha^2 \sigma_m^2 \right]. \quad (9.18)$$

Понятно, что коэффициент α зависит от коэффициента Пуассона ν , но так как упругий коэффициент Пуассона для пенометаллов $\nu \approx 0$, так как большая часть деформации пластическая, то будет более аккуратно использовать пластический коэффициент Пуассона ν^p , тогда

$$\alpha^2 = \frac{9(1-2\nu^p)}{2(1+\nu^p)}. \quad (9.19)$$

Как говорилось ранее, параметр α отвечает за форму поверхности текучести. Нетрудно видеть, что коэффициент α находится в пределах $0 \leq \alpha \leq 4,5$. Верхний предел говорит о том, что пластический коэффициент Пуассона $\nu^p = 0$, то есть условные напряжения совпадают с истинными, в то время как нижний предел соответствует критерию пластичности Мизеса. Влияние параметра α на форму поверхности текучести показано на рис. 9.83.

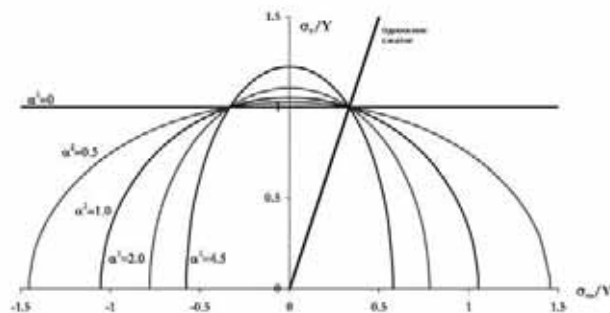


Рис. 9.83. Влияние параметра α на форму поверхности текучести

На (рис. 9.84а) показан испытываемый образец и схематически показаны прикладываемые к нему нагрузки (рис. 9.84б), где p – гидростатическое давление и σ – осевое сжимающее напряжение (оба взяты положительными при сжатии). Среднее напряжение σ_m и интенсивность напряжения σ_e выражаются в терминах (p, σ) как:

$$\sigma_m = -\left(p + \frac{\sigma}{3}\right), \quad \sigma_e = |\sigma|. \quad (9.20)$$

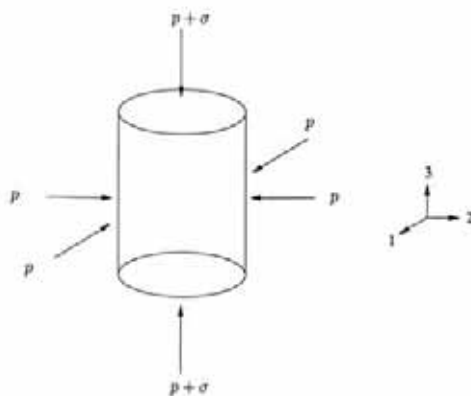


Рис. 9.84. а) Испытываемый образец; б) Схема прикладываемых нагрузок

При испытаниях тесты на сложное нагружение проводились на гидравлической машине (рис. 9.85) по схеме, показанной на (рис. 9.86).

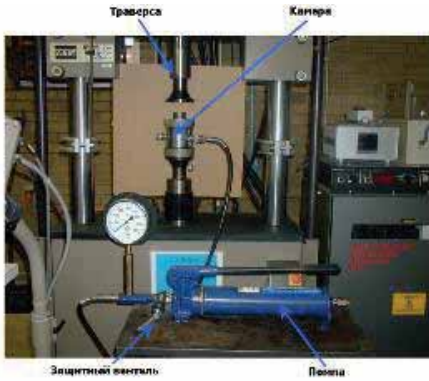


Рис. 10.85. Испытательная машина

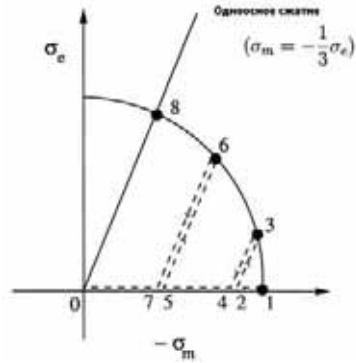


Рис. 10.86. Схема нагружения образца

Кратко опишем процесс нагружения, с помощью которого определялась начальная поверхность текучести [2]. Вначале, образец нагружается гидростатическим давлением до достижения остаточных пластических деформаций 0,3 % (путь 0–1). Это давление берется за предел текучести при всестороннем сжатии. Далее давление уменьшается на 0,1 МПа (путь 1–2) и прикладывается осевое смещение ($\dot{\epsilon} = 4 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) до тех пор, пока осевые остаточные пластические деформации не достигнут уровня 0,3 % (путь 2–3). Осевая нагрузка далее снимается (путь 3–4) и давление уменьшается еще на 0,1 МПа (путь 4–5) и процедура повторяется (путь 5–6–7). Процедура зондирования напряжений продолжается до тех пор, пока гидростатическое давление не станет равным нулю, в этом состоянии достигается одноосное сжатие образца (путь 0–8) и измеряется предел текучести при одноосном сжатии. Геометрическое место точек измеренных значений предела текучести отрисовывается в осях среднего напряжения σ_m и интенсивности напряжения σ_e . Из (рис. 9.87) видна хорошая аппроксимация экспериментальных данных вышеописанной моделью.

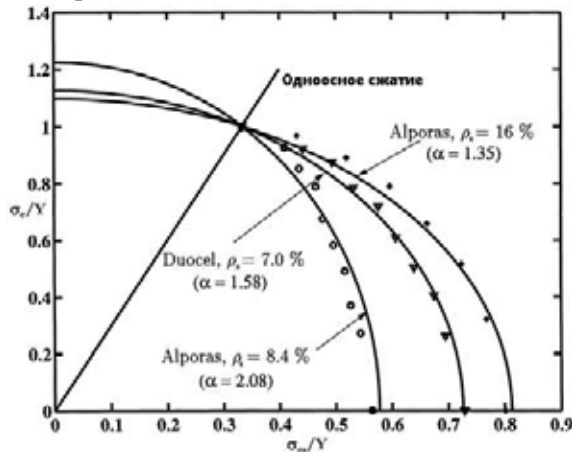


Рис. 9.87. Начальная поверхность текучести для разных видов пенометаллов. Напряжения нормированы на величину предела текучести при одноосном сжатии (0,5 МПа для Duocel $\rho_s = 7\%$, 1 МПа для Alporas $\rho_s = 8,4\%$; 2 МПа для Alporas $\rho_s = 16\%$)

Эволюция поверхности текучести под действием одноосного и всестороннего сжатия показана на рис. 9.88 для разных видов пенометаллов [2].

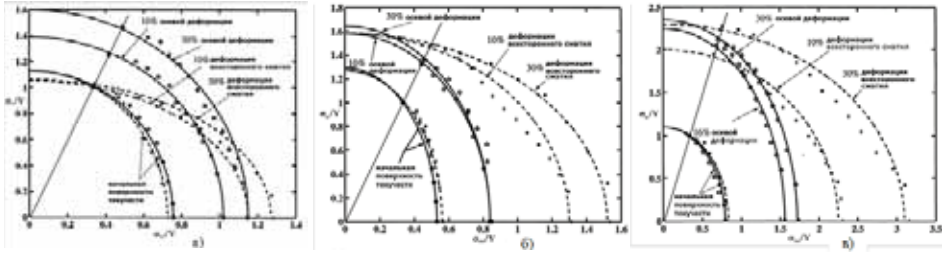


Рис. 9.88. Эволюция поверхности текучести пенометаллов под действием одноосного и всестороннего сжатия: а) Duocel $\rho_s = 7\%$; б) Alporas $\rho_s = 8,4\%$; в) Alporas $\rho_s = 16\%$

Видно, что поверхность текучести остается квадратичной. Под действием одноосного сжатия поверхность текучести практически сохраняет само-подобие начальной поверхности (форма поверхности не меняется), в то время как под действием всестороннего сжатия поверхность текучести вытягивается вдоль горизонтальной оси (оси среднего напряжения). В случае с пенометаллом Duocel не возникает поперечного упрочнения под действием всестороннего сжатия: предел текучести на сдвиг остается неизменным с увеличением деформации всестороннего сжатия.

Для дальнейшего исследования модели, попытаемся расписать выражение (9.21) в терминах скоростей пластической деформации. Из ассоциативного закона течения:

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon}^p &= \dot{\lambda} \frac{\partial \Phi}{\partial \sigma}, \\ \dot{\hat{\epsilon}} &= -\dot{\lambda} \frac{\partial \Phi}{\partial R}, \end{aligned} \quad (9.21)$$

где $\dot{\lambda}$ - параметр пластичности.

Скорость пластической деформации может быть выражена как

$$\dot{\epsilon}^p = \dot{\lambda} \frac{\partial \Phi}{\partial \sigma} = \dot{\hat{\epsilon}} \frac{\partial \Phi}{\partial \sigma_e} \frac{\partial \sigma_e}{\partial \sigma} + \dot{\hat{\epsilon}} \frac{\partial \Phi}{\partial \sigma_m} \frac{\partial \sigma_m}{\partial \sigma}, \quad (9.22)$$

Где $\frac{\partial \Phi}{\partial \sigma_e} = \frac{1}{1+(\alpha/3)^2} \frac{\sigma_e}{\hat{\sigma}}$, $\frac{\partial \Phi}{\partial \sigma_m} = \frac{\alpha^2}{1+(\alpha/3)^2} \frac{\sigma_m}{\hat{\sigma}}$

$$\frac{\partial \sigma_e}{\partial \sigma} = \frac{3}{2} \frac{\sigma^{dev}}{\sigma_e}, \quad \frac{\partial \sigma_m}{\partial \sigma} = \frac{1}{3} I.$$

Тогда интенсивность скорости пластической деформации будет равна

$$\dot{\epsilon}_e = \sqrt{\frac{2}{3} \dot{\hat{\epsilon}}^{p,dev} \dot{\hat{\epsilon}}^{p,dev}} = \frac{\dot{\hat{\epsilon}}}{1+(\alpha/3)^2} \frac{\sigma_e}{\hat{\sigma}} = \dot{\hat{\epsilon}} \frac{\partial \Phi}{\partial \sigma_e}, \quad (9.23)$$

и средняя скорость пластических деформаций будет равна

$$\dot{\varepsilon}_m = tr(\dot{\varepsilon}^p) = \frac{\alpha^2 \dot{\hat{\varepsilon}}}{1 + (\alpha/3)^2} \frac{\sigma_m}{\hat{\sigma}} = \dot{\hat{\varepsilon}} \frac{\partial \Phi}{\partial \sigma_m}. \quad (9.24)$$

Тогда можно выразить скорость пластических деформаций через шаровую и девиаторную часть как:

$$\dot{\varepsilon}^p = \dot{\varepsilon}_e \frac{3}{2} \frac{\sigma^{dev}}{\sigma_e} + \dot{\varepsilon}_m \frac{1}{3} \mathbf{I}. \quad (9.25)$$

Пользуясь вышеизложенными зависимостями (9.21), (9.22 – 9.24) перепишем выражение (9.20) в терминах скоростей пластической деформации:

$$\dot{\hat{\varepsilon}}^2 = \left[1 + \left(\frac{\alpha}{3} \right)^2 \right] \left(\dot{\varepsilon}_e^2 + \frac{1}{\alpha^2} \dot{\varepsilon}_m^2 \right). \quad (9.26)$$

Для аппроксимации функции упрочнения в выражении (2), воспользуемся формулой [1]:

$$R(\hat{\varepsilon}) = \gamma \frac{\hat{\varepsilon}}{\varepsilon_D} + \alpha_2 \ln \left(\frac{1}{1 - \left(\frac{\hat{\varepsilon}}{\varepsilon_D} \right)^\beta} \right). \quad (9.27)$$

Таким образом, напряжения течения будут описываться выражением:

$$Y = \sigma_p + \gamma \frac{\hat{\varepsilon}}{\varepsilon_D} + \alpha_2 \ln \left(\frac{1}{1 - \left(\frac{\hat{\varepsilon}}{\varepsilon_D} \right)^\beta} \right),$$

где σ_p , γ , α_2 , β – параметры материала из аппроксимации кривой деформирования, полученные из теста на одноосное сжатие, они могут зависеть от плотности пенометалла.

$$\left\{ \sigma_p, \gamma, \alpha_2, \frac{1}{\beta} \right\} = C_0 + C_1 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^n, \quad (9.28)$$

где C_0 , C_1 , n – константы. На Рис. 9.89 показано, как различные параметры влияют на функцию упрочнения.

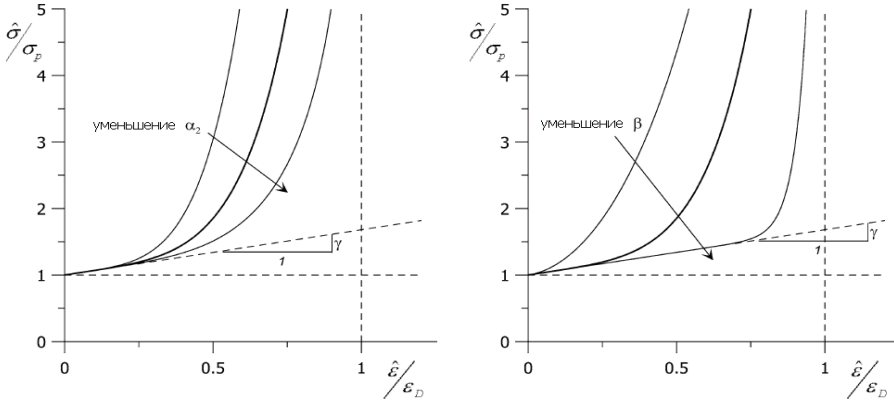


Рис. 9.89. Влияние параметров модели на функцию упрочнения

Параметр ϵ_D , использующийся в выражении (9.21), это деформация уплотнения (смотри (3)). Она может быть выражена из уравнений (9.27)–(9.30), как:

$$\hat{\epsilon} = \frac{1 + (\alpha/3)^2}{\alpha} \frac{|\epsilon_m|}{\sqrt{1 + (\alpha/3)^2 - \chi^2}} = \frac{\sqrt{1 + (\alpha/3)^2}}{\alpha} \frac{|\epsilon_m|}{\sqrt{1 - (1 + (\alpha/3)^2)(\chi^*)^2}},$$

где $\chi = \sigma_e/\hat{\sigma}$, $\chi^* = \epsilon_e/\hat{\epsilon}$ – безразмерные параметры модели. Они связаны взаимоотношением:

$$\chi^* = \frac{\epsilon_e}{\hat{\epsilon}} = \frac{1}{\sqrt{1 + (\alpha/3)^2}} \frac{\sigma_e}{\hat{\sigma}} = \frac{1}{\sqrt{1 + (\alpha/3)^2}} \chi. \quad (9.29)$$

Теоретически ϵ_D может быть определена как предел деформации, при котором плотность пенометалла равна плотности основного металла, т.е. когда $\epsilon_m = -\ln(\rho^*/\rho_s)$. Параметр ϵ_D зависит от способа нагружения и может быть выражен как [1]:

$$\epsilon_D = -\frac{1 + (\alpha/3)^2}{\alpha \sqrt{1 + (\alpha/3)^2 - \chi^2}} \ln\left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right). \quad (9.30)$$

Для одноосного сжатия $\chi = 1$ и выражение перепишется в виде:

$$\epsilon_D = -\frac{9 + \alpha^2}{3\alpha^2} \ln\left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right). \quad (9.31)$$

Как мы уже говорили, параметр ϵ_D зависит от способа нагружения, что показано на рис. 9.90.

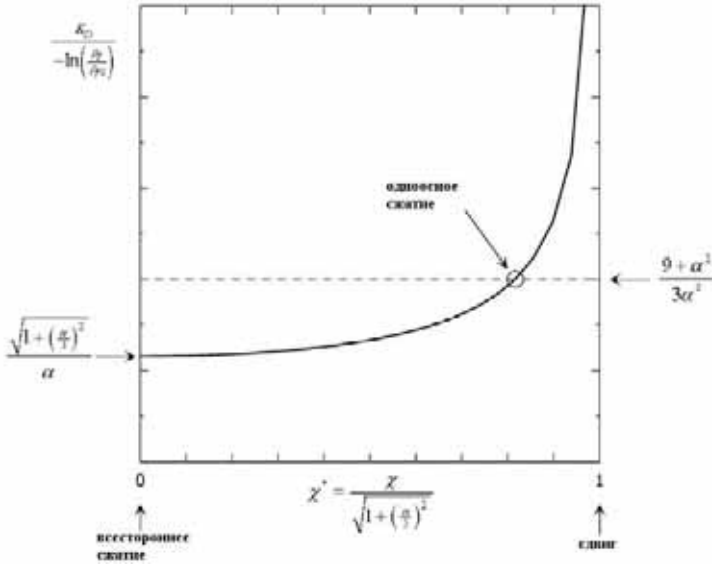


Рис. 9.90. Деформация уплотнения как функция способа нагружения

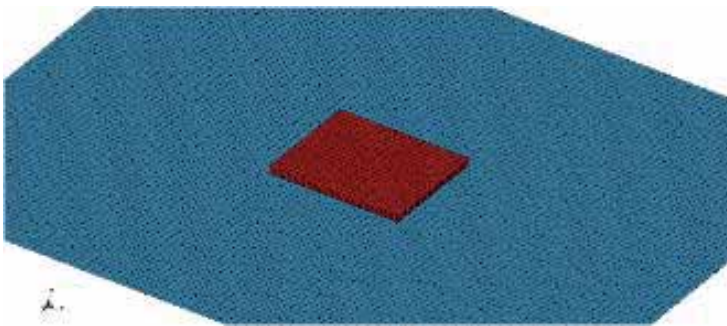


Рис. 9.91. Модель тестовой задачи

Параметр χ^* варьируется от 0 до 1. Если $\chi^* = 0$, то имеет место всестороннее сжатие материала, в то время как при $\chi^* = 1$ происходит чистый сдвиг. В случае испытания на чистый сдвиг $\varepsilon_D \rightarrow \infty$, что означает, что чистый сдвиг не вызывает уплотнения материала. Также на рисунке отмечено состояние одноосного сжатия.

9.8.3. Тестирование методики и программного продукта

Для отработки методики расчетов взрывного воздействия на стенки корпуса трансформатора с учетом влияния защиты из пеноалюминия проведены серия расчетов тестовой задачи. Расчетная модель тестовой задачи состоит из квадратной стальной пластины заданной толщины, моделирующей стенку трансформатора (рис. 9.91). К пластине приложено ударное воздействие в виде давления от точечного взрыва (9 кг, расстояние 0,4 м от центра пластины).

Рассмотрены два варианта задачи. В первом варианте ударное воздействие приложено непосредственно к стальной пластине. Во втором варианте на поверхности пластины расположена квадратная вставка из пеноалюминия, моделирующая защиту стенок трансформатора. В этом случае ударное воздействие приложено к внешней поверхности этой вставки и свободной поверхности стальной пластины (рис. 9.91). Задача рассмотрена в трехмерной постановке. Пластина моделируется трехмерными оболочечными четырехузловыми, а вставка из пеноалюминия – объемными восьмиузловыми конечными элементами. Для стальной пластины использована модель теории течения с кинематическим упрочнением, а для пеноалюминия – модель Дешпанда-Флека. Пластина закреплена по краям по трем направлениям. На рис. 9.92 приведены результаты расчета тестовой задачи для двух вариантов. Результаты расчета первого варианта – пластины без защиты – приведены на рис. 9.93. На рис. 9.93 показано распределение перемещений пластины от ударного воздействия в различные моменты времени. На рис. 9.94 показано распределение интенсивности пластических деформаций в пластине в различные моменты времени. Как видно из приведенных результатов, в центре пластины развивается большой уровень пластических деформаций, приводящий к разрушению (рис. 9.95). Результаты расчета второго варианта – пластины с защитой из пеноалюминия – приведены на рис. 9.95. На рис. 9.95 показано распределение перемещений пластины от ударного воздействия в различные моменты времени. На рис. 9.95 показано распределение интенсивности пластических деформаций в пластине в различные моменты времени.

Сравнение задачи пластины с защитой из пеноалюминия с задачей пластины без защиты показывает, что перемещения пластины уменьшились на величину около 5 %. Уровень пластических деформаций также уменьшился, и не достигает предельных величин (ϵ), таким образом, разрушение пластины не происходит.

Из анализа приведенных результатов можно сделать вывод, что наличие защиты из пеноалюминия положительно влияет на деформацию стальной пластины. Перемещения пластины уменьшаются, и, соответственно, уменьшаются деформации. При наличии разрушения пластины без защиты при заданном уровне ударного воздействия возможно подобрать размеры защиты из пеноалюминия, предотвращающие развитие разрушения.

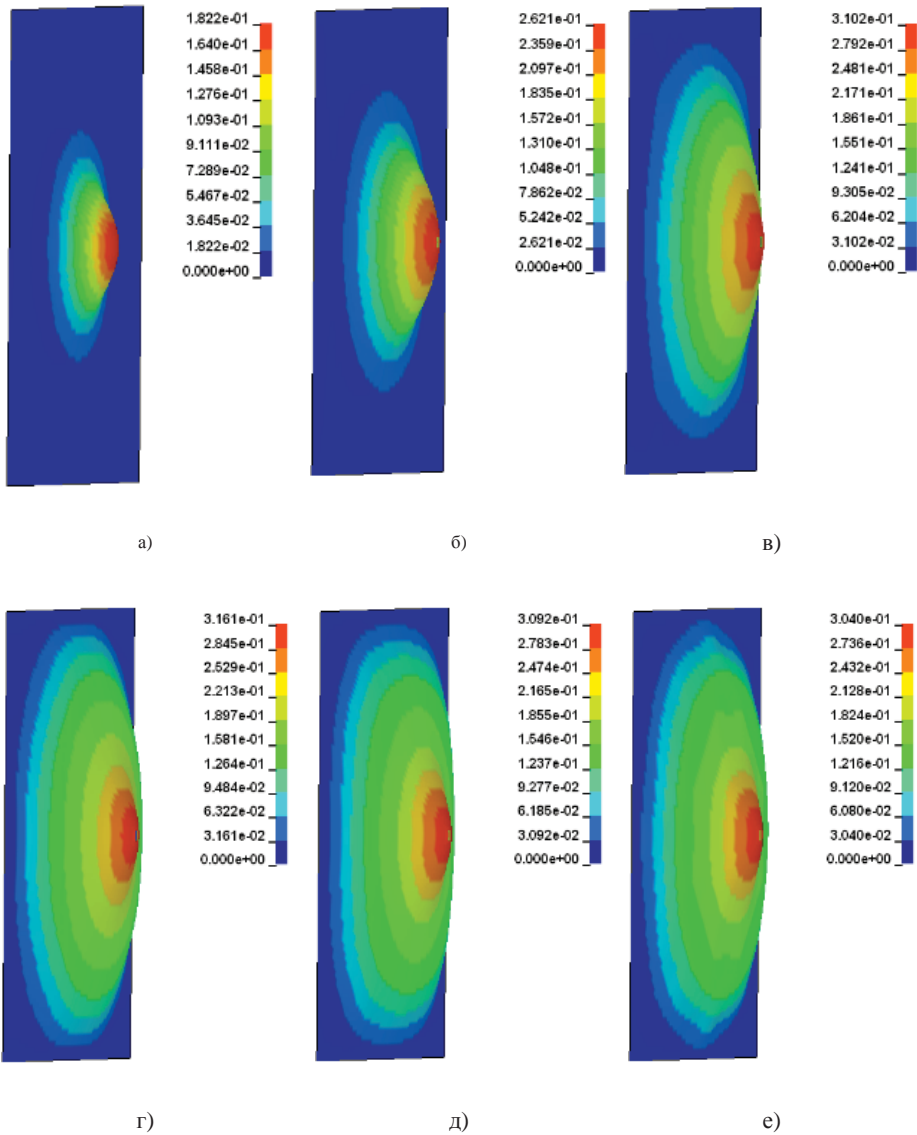


Рис. 9.92. Распределение перемещений (м) пластины без защиты в различные моменты времени: а) 0,0005 мс; б) 0,001 мс; в) 0,002 мс; г) 0,003 мс; д) 0,004 мс; е) 0,005 мс

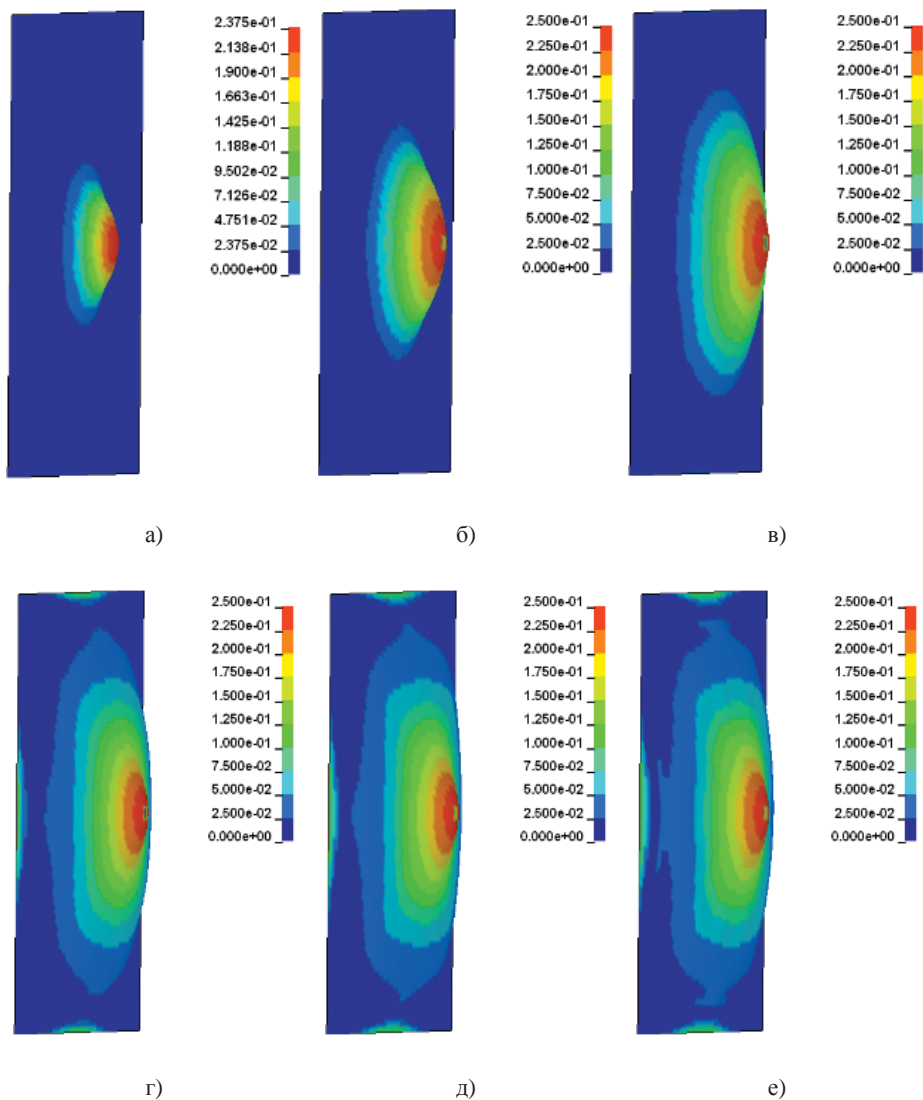


Рис. 9.93. Распределение интенсивности пластических деформаций в пластине без защиты в различные моменты времени: а) 0,0005 мс; б) 0,001 мс; в) 0,002 мс; г) 0,003 мс; д) 0,004 мс; е) 0,005 мс

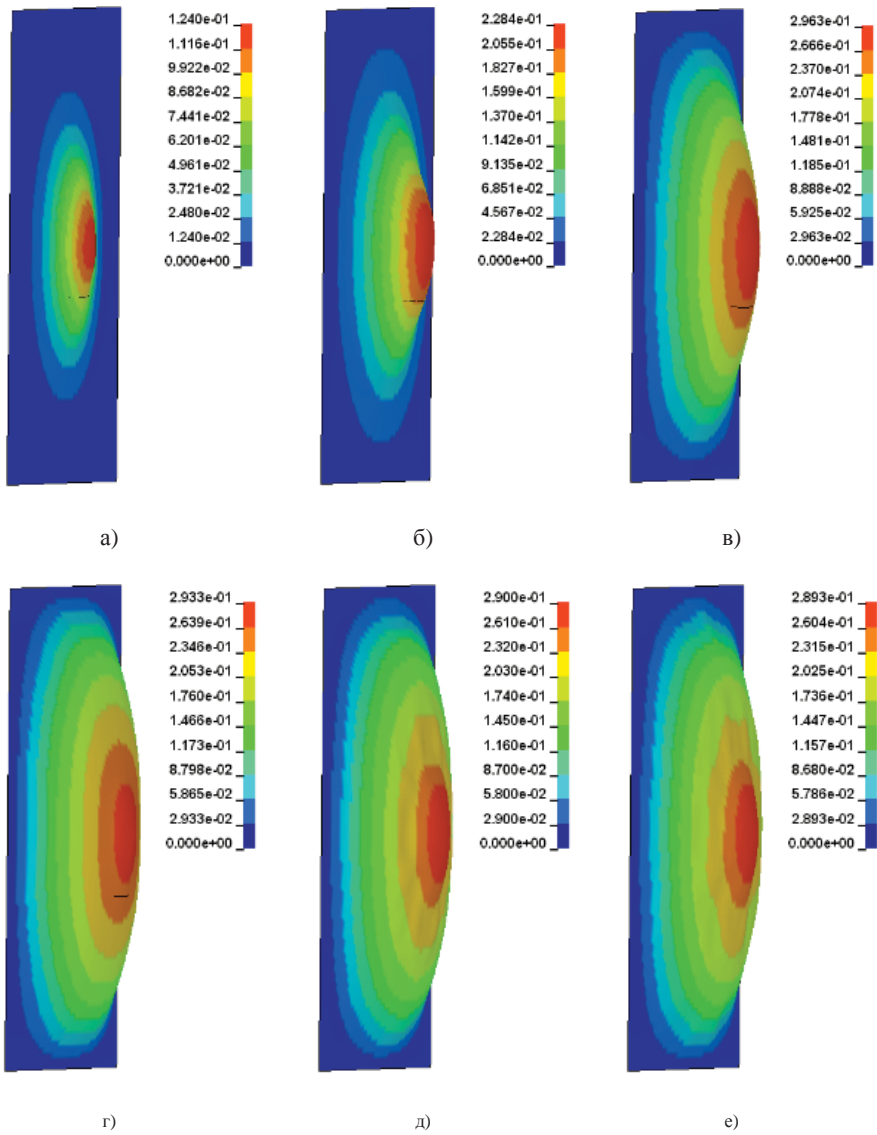


Рис. 9.94. Распределение перемещений (м) пластины с защитой из пеноалюминия в различные моменты времени: а) 0,0005 мс; б) 0,001 мс; в) 0,002 мс; г) 0,003 мс; д) 0,004 мс; е) 0,005 мс

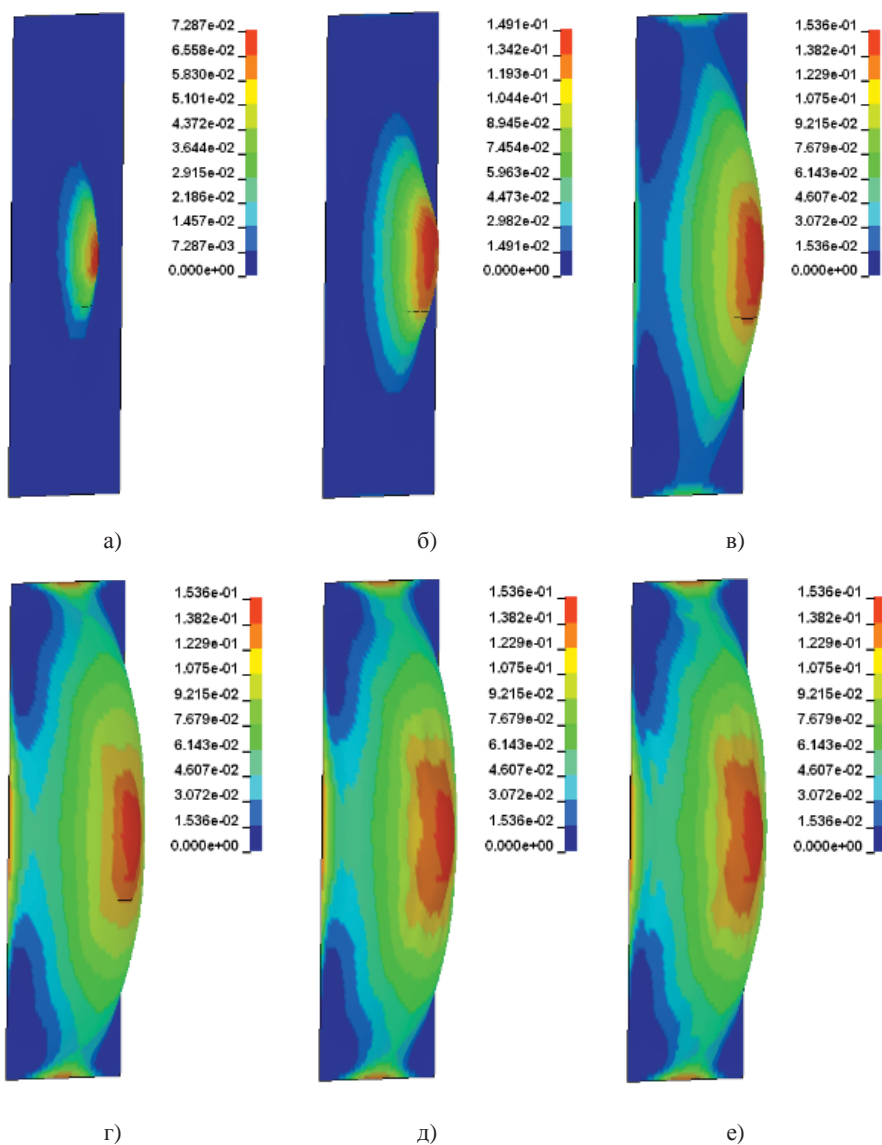


Рис. 9.95. Распределение интенсивности пластических деформаций в пластине с защитой из пеноалюминия в различные моменты времени: а) 0,0005 мс; б) 0,001 мс; в) 0,002 мс; г) 0,003 мс; д) 0,004 мс; е) 0,005 мс

9.8.4. Результаты расчета ударного воздействия на корпус

Проведены расчетные исследования корпуса конструкции трансформатора при ударном воздействии. Расчеты проведены для двух вариантов конструкции – без защиты и со вставками из пеноалюминия.

Ударное воздействие моделировалось подрывом взрывчатого вещества в тротиловом эквиваленте, расположенного в центральной части внутреннего объема корпуса. Для оценки влияния защиты из вставок из пеноалюминия

подобраны массы заряда, при котором начинается разрушение стенок корпуса трансформатора без защиты, и показано, что установка защиты предотвращает разрушение.

Результаты расчетов приведены на рис. 9.96 - 9.103. На рис. 9.96 - 9.103 приведены результаты расчетов конструкции без защиты для двух вариантов при различной массе заряда. На рис. 9.96 - 9.97 показано распределение перемещений в стенке корпуса в различные моменты времени. На рис. 9.98 показано распределение интенсивности пластических деформаций в стенке корпуса на последнем расчетном шаге по времени. Из приведенных рисунков видно, что при массе заряда 8 кг в стенке корпуса пластические деформации достигают предельных значений (25 %), при которых начинается разрушение.

На рис. 9.102 - 9.103 приведены результаты расчета корпуса трансформатора со вставками из пеноалюминия. На рис. 9.96 - 9.98 показано распределение перемещений в стенке корпуса в различные моменты времени. На рис. 9.100 - 9.101 показано распределение интенсивности пластических деформаций в стенке корпуса на последнем расчетном шаге по времени. На рис. 9.102 - 9.102 показано распределение интенсивности пластических деформаций в вставках из пеноалюминия в различные моменты времени. Приведенные результаты показывают влияние установки защиты. Перемещения стенок корпуса в данных вариантах расчета уменьшаются на величину около 40 %. Это приводит к уменьшению пластических деформаций, которые не достигают предельных значений, и разрушение стенки корпуса трансформатора не происходит.

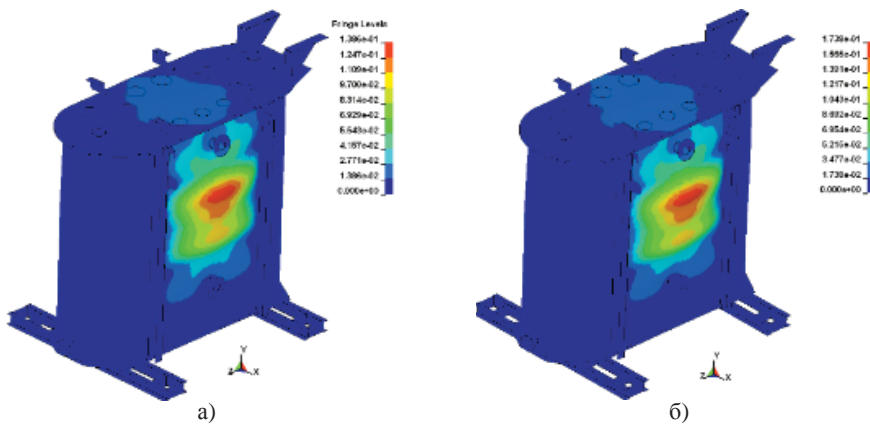


Рис. 9.96. Распределение перемещений (м) в момент времени $t = 1$ мс при разном уровне ударного воздействия: а) масса 6 кг; б) масса 8 кг

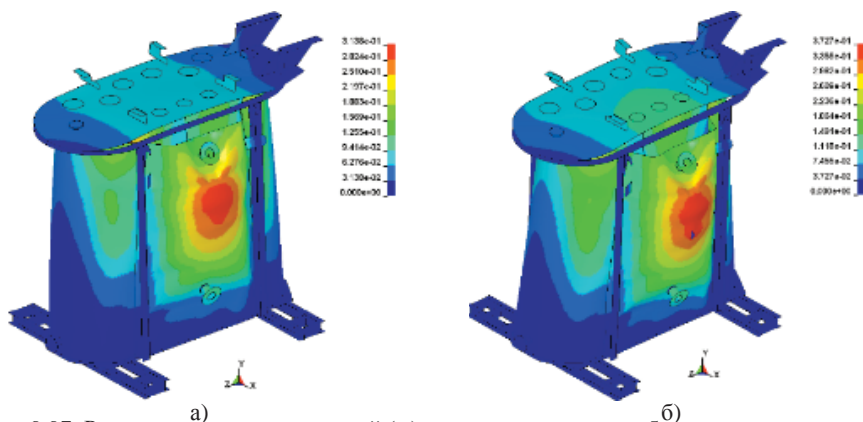


Рис. 9.97. Распределение перемещений (м) в момент времени $t = 5$ мс при разном уровне ударного воздействия: а) масса 6 кг; б) масса 8 кг

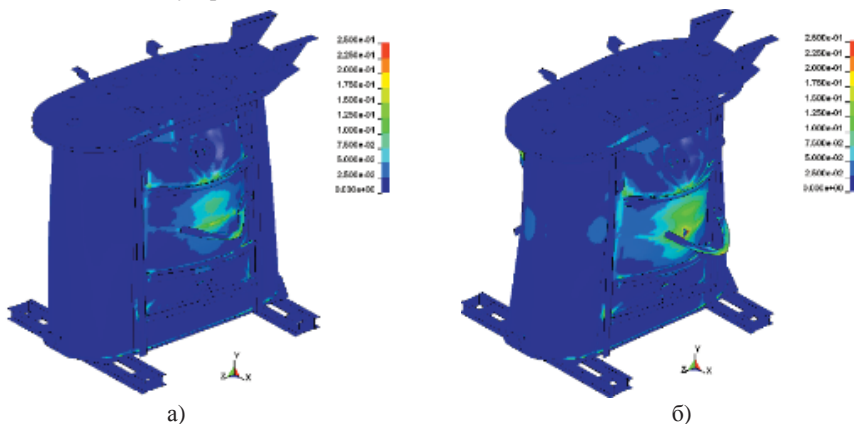


Рис. 9.98. Распределение интенсивности пластических деформаций в момент времени $t = 5$ мс при разном уровне ударного воздействия: а) масса 6 кг; б) масса 8 кг

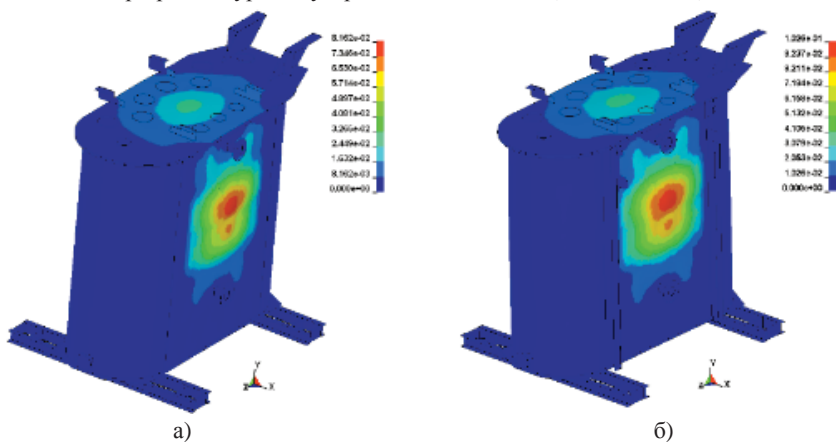


Рис. 9.99. Распределение перемещений (м) в момент времени $t = 1$ мс при разном уровне ударного воздействия: а) масса 6 кг; б) масса 8 кг

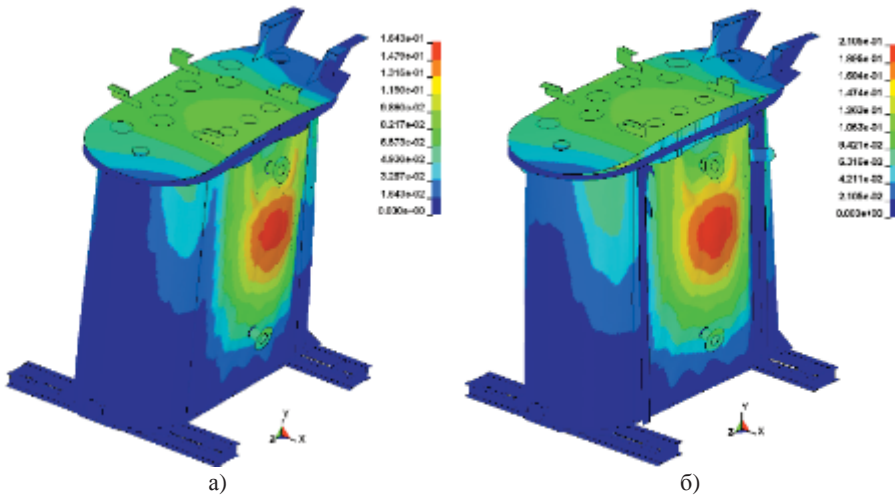


Рис. 9.100. Распределение перемещений (м) в момент времени $t = 5$ мс при разном уровне ударного воздействия: а) масса 6 кг; б) масса 8 кг

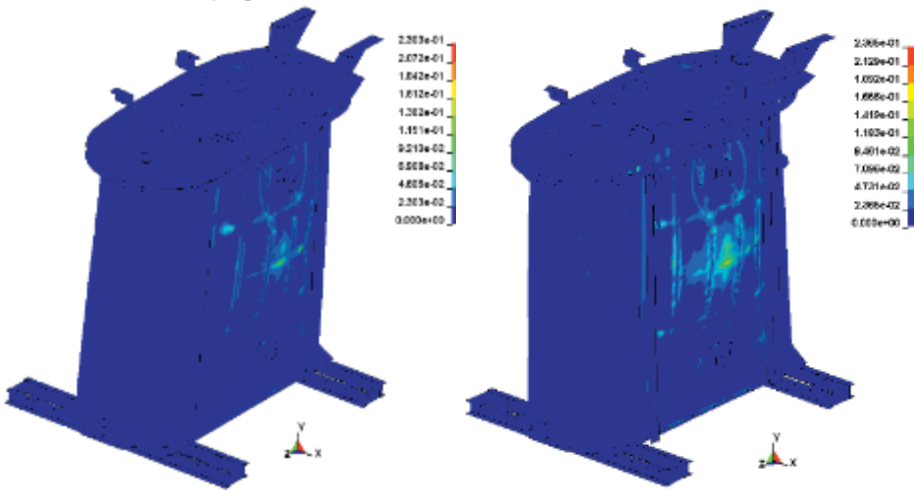


Рис. 9.101. Распределение интенсивности пластических деформаций в корпусе в момент времени $t = 5$ мс при разном уровне ударного воздействия: а) масса 6 кг; б) масса 8 кг

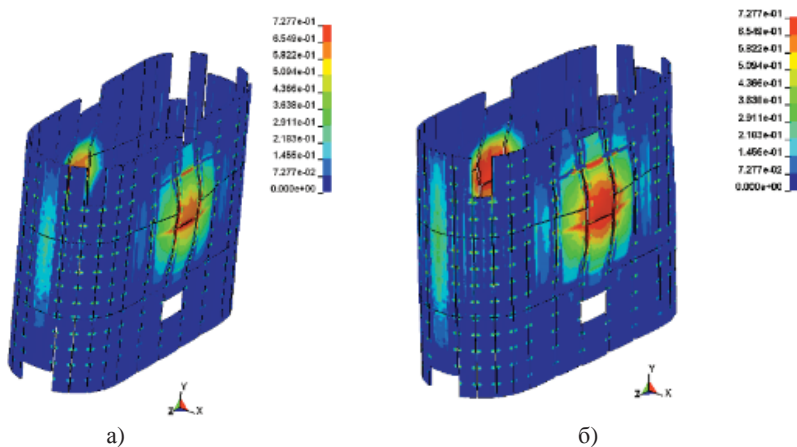


Рис. 9.102. Распределение интенсивности пластических деформаций во вставках пеноалюминия в момент времени $t = 1$ мс при разном уровне ударного воздействия: а) масса 6 кг; б) масса 8 кг

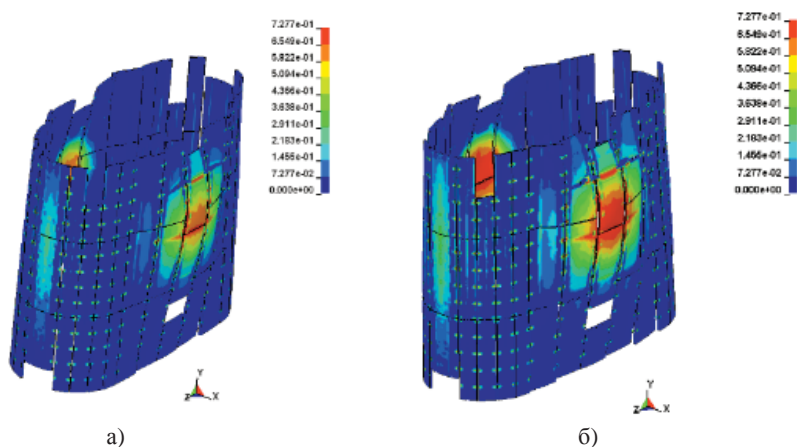


Рис. 9.103. Распределение интенсивности пластических деформаций во вставках пеноалюминия в момент времени $t = 5$ мс при разном уровне ударного воздействия: а) масса 6 кг; б) масса 8 кг

На (рис. 9.104) и (рис. 9.105) приведены соответственно графики изменения перемещений и интенсивности пластических деформаций в критической точке стенки трансформатора для двух вариантов расчета – без вставок и со вставками из пеноалюминия. Как видно из приведенных графиков, наличие вставок уменьшает перемещение и предотвращает разрушение (рис. 9.105).

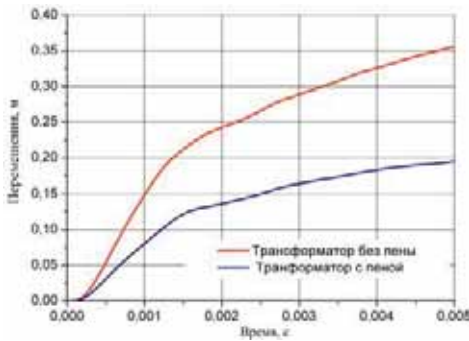


Рис. 9.104. Графики изменения перемещений в критической точке стенки трансформатора для вариантов без вставок и со вставками из пеноалюминия

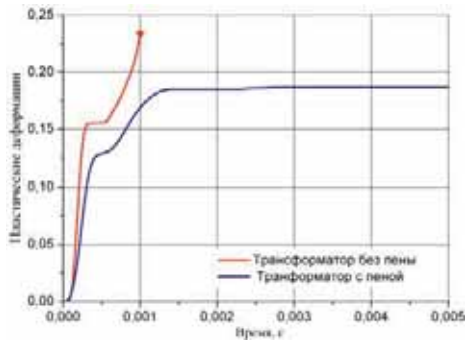


Рис. 9.105. Графики изменения интенсивности пластических деформаций в критической точке стенки трансформатора для вариантов без вставок и со вставками из пеноалюминия (символом \blacklozenge обозначен момент разрушения)

На рис. 9.106–9.107 приведены результаты расчета при ударном воздействии от короткого замыкания. В это варианте расчета разрушения начинается в зонах соединения стенок с верхней крышкой и дном (рис. 9.109).

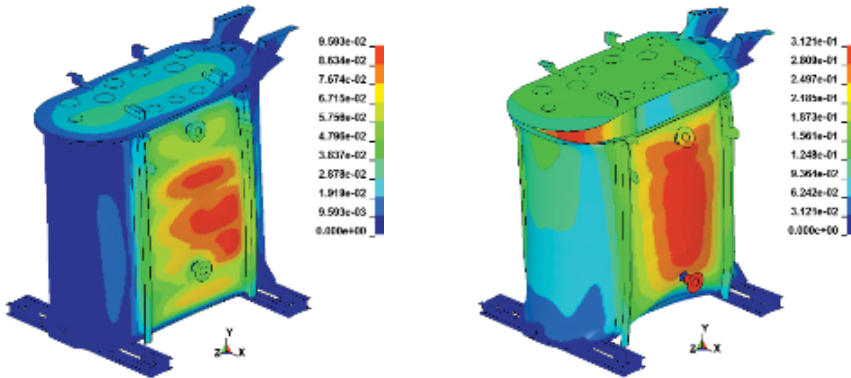


Рис. 9.106. Распределение перемещений (м) от ударного воздействия при коротком замыкании в моменты времени: а) $t = 2$ мс; б) $t = 5$ мс

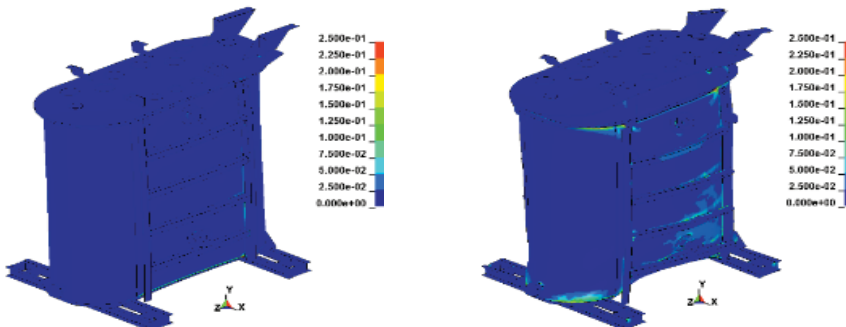


Рис. 9.107. Распределение интенсивности пластических деформаций от ударного воздействия при коротком замыкании в моменты времени: а) $t = 2$ мс; б) $t = 5$ мс

Следует отметить, что установка защиты на стенки корпуса трансформатора не влияет на поведение крышки. В всех вариантах расчета происходит ее отрыв по болтовым соединениям вдоль периметра. Это связано с тем, что на поверхности крышки не установлена защита, и ударное воздействие полностью воспринимается ее поверхностью. Для предотвращения разрушения крышки, вероятно, также необходимо установка на ней вставок из пеноалюминия для защиты и усиления болтового соединения, что требует дополнительных расчетных исследований

Анализ проведенных экспериментов и рисунков позволяет сделать следующие выводы:

1. Для эффективного использования плит из пористого алюминия в качестве материала, поглощающего энергию ударной волны, падающей на него из жидкой или газообразной среды, необходимо дополнительно защищать поверхность этого материала (например, слоем диэлектрика). Винипласт, примененный для этой цели в данной работе, хорошо справляется с ролью защитного слоя в случае однократного воздействия, однако желательно было бы использовать материал, обладающий большей пластичностью. Для выбора и определения эффективной толщины и особенностей использования материала защитного слоя необходимо проведение дополнительных экспериментов.

Таблица 9.9. Электрические параметры экспериментов

№	Напряжение заряда конденсаторной батареи, В	Запасенная в конденсаторной батарее энергия, кДж	Выделившаяся в дуге энергия, кДж
1	1000	50	40
2	1400	100	80
3	2000	200	160
4	3000	450	360
5	3500	610	490
6	4000	800	640

Таблица 9.10. Показания датчиков перемещения (индикаторов часового типа)

Напряжение на батарее, кВ	Индикатор № 1 (правая стенка), мм	Индикатор № 2 (левая стенка), мм	Индикатор № 3 (крышка), мм
1,4	3,25	2,82	4,17
2,0	6,58	4,5	6,85
3,0	11,55	8,1	14,5
3,5	16,4/1,1*	13,9/1,1*	Поломка индикатора
4,0	16,65/1,3*	16,3/1,3*	16,3

*в знаменателе указана пластическая деформация.

На рисунках 9.108 - 9.109 показаны графики изменения положения точки на плоской стенке трансформатора при разрядах с энергией 40–640 кДж соответственно. При 5 разряде произошел сбой скоростной камеры, поэтому деформацию стенки заснять не удалось.

На Рис. 9.110 приведены графики изменения положения точки на плоской стенке бака трансформатора (40 кДж).

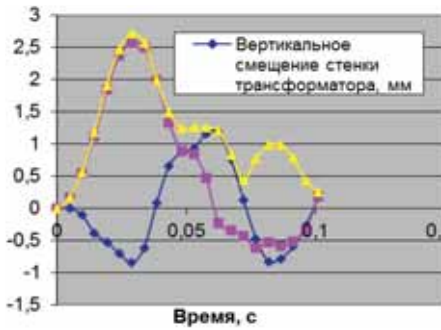


Рис. 9.108. Графики изменения положения точки на плоской стенке бака трансформатора (80 кДж)

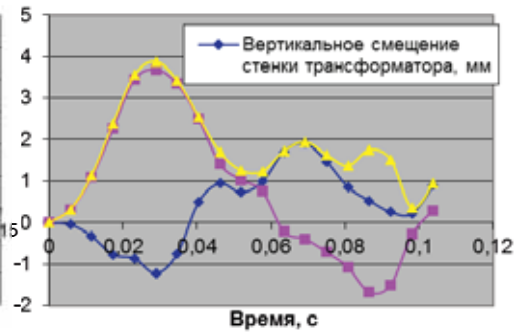


Рис. 9.109. Графики изменения положения точки на плоской стенке бака трансформатора (160 кДж)

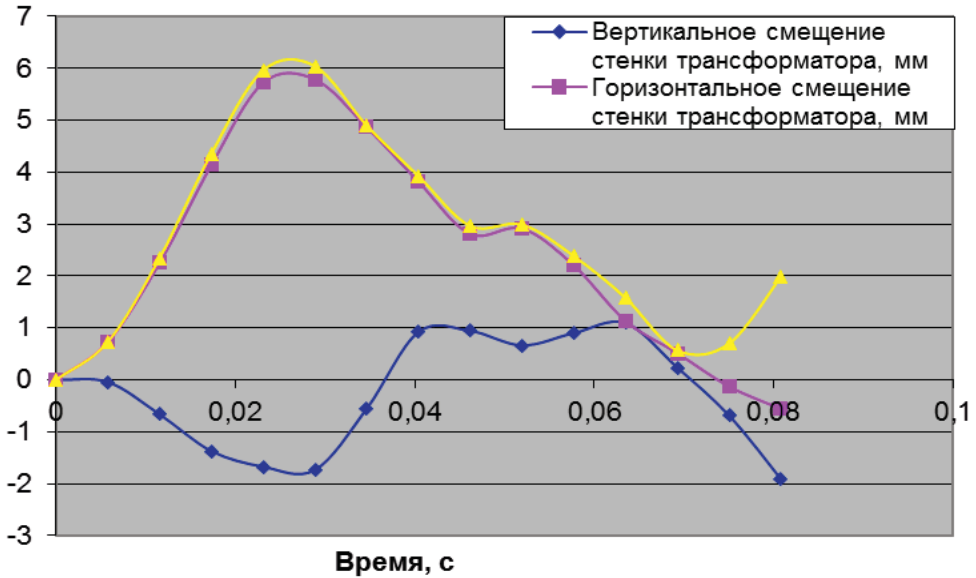


Рис. 9.110. Графики изменения положения точки на плоской стенке бака трансформатора (360 кДж)

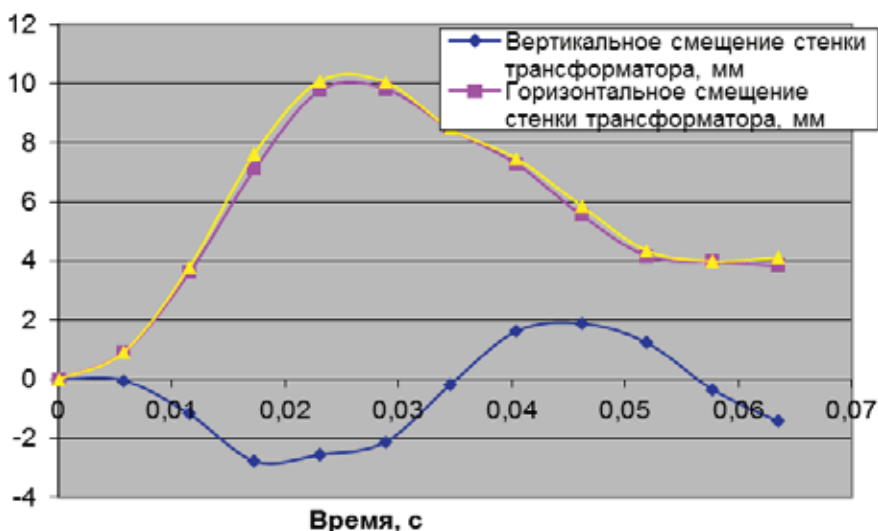


Рис. 9.111. Графики изменения положения точки на плоской стенке бака трансформатора (640 кДж)

Осмотр трансформатора показал, что в результате последовательности коротких замыканий с возрастающей мощностью трансформатор получил следующие повреждения:

- крышка приобрела равномерно выпуклую форму, выпуклость центральной части крышки относительно фланца составляет 8–10 мм;
- большие грани бака равномерно раздулись, деформация с разных сторон составляет от 8 до 12 мм;
- треснул сварной шов на нижнем патрубке коллектора радиатора, появилась течь масла.

Заключение по главе 9

Испытания трансформатора с системой защиты от взрыва на основе демпфирующих материалов подтвердили эффективность применения его защиты пеноалюминием. Если при действии короткого замыкания мощностью 10 кДж стенки трансформатора перемещались на 10 мм, то влияние защиты оказалось весьма существенным, так как при увеличении мощности короткого замыкания до 640 кДж остаточные перемещения стенок трансформатора не превысили 2–3 мм. Предлагаемое решение защиты высоковольтного маслаполненного оборудования (в том числе и трансформаторов) от взрыва и пожара при коротком замыкании основан на применении демпферного устройства, которое позволяет высвободить объем масляного бака в результате сжатия демпфирующего слоя под действием импульсного давления, что компенсирует объем газового пузыря, обуславливающего на реальных объектах разрушительные нагрузки. Теоретически обосновано: демпферная система позволяет надежно защитить от взрыва и пожара объекты высоковольтного маслаполненного электрооборудования при коротком замыкании, при этом нагрузки (избыточное давление) не превышают 0,5...0,7 атм. Предлагаемая система защиты на порядок ниже по стоимо-

сти по сравнению с получившей распространение французской системой защиты «SERGI». Экспериментальные исследования волновых процессов и нагрузок на корпус высоковольтного маслонаполненного электрооборудования показали эффективность работы предлагаемой демпферной системы. Эффективность демпфирования как отношение амплитуды давления на поверхности стенки экспериментальной установки без демпфера к амплитуде давления на той же стенке, но с демпфером зависит от материала демпфера и его объема.

Литература

1. *Иванов Д.О.* Исследование и разработка пеноалюминия, получаемого методом механического легирования из вторичного сырья. Дисс на соиск. уч. ст. канд. техн. н. 2008, Москва, МГТУ им. Баумана.
2. Пенометаллы (пеноалюминий) [Электронный ресурс], [2019]. <https://mydocs.ru/7-38282.html>
3. *Сарафанов, М. А.* Новая технология и оборудование для получения конструкционных материалов на основе пеноалюминия / М. А. Сарафанов // Тяжелое машиностроение. – 2011. – №2. – С. 34 – 38.
4. Пеноматериалы (пенометаллы) [Электронный ресурс], [2011]. – Режим доступа : <http://ekokataliz.ru/penomaterials/>
5. *Фурман Е. Л.* Перспективы технологий получения и применения пористых отливок / Е. Л. Фурман, А. Б. Финкельштейн, М. Л. Черный // Литейщик России. – 2012. – № 9. – С. 27–29.
6. *Иванов, Д. О.* Перспективные методы получения пеноалюминия // Д. О. Иванов, А. А. Аксенов // Металлургия машиностроения. – 2008. – № 6. – С. 35–38.
7. Научная жизнь. Дискуссии / ОАО ВИЛС // Технология легких сплавов. – 2006. – № 2–3. – С. 208–221.
8. Пат. № 2026394 РФ, С22С1/08, С22В21/00. Способ получения вспененного алюминия / В. Н. Буньков, Е. Ю. Решетников, В. П. Бугаков. – № 5060351/02, заявл. 25.08.1992; опубл. 09.01.1995.
9. Пат. № 2016113 РФ, С22С1/08. Способ получения вспененного металла / В. Н. Буньков, Е. Ю. Решетников, В. В. Глызин, С. В. Ливанцов. – № 5042556/02, заявл. 20.05.1992; опубл. 15.07.1994.
10. Пат. № 2068455 РФ, С22С1/08, С22В21/00. Способ получения пеноалюминия / В. Н. Буньков, Е. Ю. Решетников, В. В. Глызин, С. В. Ливанцов. – № 5042890/02, заявл. 20.05.1992; опубл. 27.10.1996.
11. Пат. № 2180361 РФ, С22С1/08, В22D11/04, В22D21/04. Способ получения изделий из пеноалюминия / В. С. Романова, И. С. Полькин, А. М. Пономаренко, В. В. Яковенко, М. Б. Новикова, С. Г. Вачьянц, В. К. Король. – № 99116105/02, заявл. 20.07.1999; опубл. 10.03.2002.
12. Пат. № 2233346 РФ, С22С21/10, С22С1/08, С22F1/053, В22D11/04. Алюминиевый сплав для получения пеноалюминия и способ получения изделий из него / А. М. Пономаренко, В. С. Романова, И. С. Полькин, М. Б. Новикова, Е. М. Трубкина, А. М. Бисьев. – № 2003111419/02, заявл. 22.04.2003; опубл. 27.07.2004.

13. Пат. № 2378087 РФ, В22Д 25/00, В22Д 27/00. Способ получения отливки из пеноалюминия / *А. А. Черный, В. А. Черный, С. В. Соло-монидина, Н. Б. Качелина*. – № 2008141045/02, заявл. 15.10.2008 ; опубл. 10.01.2010.
14. Пат. № 60–18465 Япония, С22С 1/08. Способ изготовления изделий из пористых металлов, 1985.
15. Фурман, Е. Л. Механические свойства пористого литого алюминия / *Е.Л. Фурман, А.Б. Финкельштейн, Н.Ю. Новожилов* // Цветные металлы. – 2007. – № 4. – С.120–122.
16. Фурман, Е. Л. Пористый литой алюминий / *Е. Л. Фурман, А. Б. Финкельштейн* // – Литейное производство. – 1997. – № 8 – 9. – С.56 – 57.
17. Получении пропиткой пористых отливок из алюминиевых сплавов / *А.Б. Финкельштейн* // Литейное производство. – 2010. – №5 – С.13–15.
18. Пат. № 2455378 РФ, С22С1/08, С22С21/00. Способ получения пеноалюминия / *Ю. Ю. Хохлов, А. И. Ковтунов, Д. А. Семистенов*. – № 201114769/02, заявл. 14.04.2011; опубл. 10.07.2012.
19. Пат. № 2400552 РФ, С22С1/08, С22В21/00, В22Д21/04. Способ получения пеноалюминия / *А. И. Ковтунов, Т. В. Чермашенцева, Д. А. Семистенов, В. П. Сидоров*. – № 2008146788/02, заявл. 26.11.2008; опубл. 27.09.2010.
20. *O. Sadot, I. Anteby, O. Levitant, S. Harush, E. Nizri, B. Ostraich, A. Schenker, G. Ben-Dor*, Dynamic compressive behaviour of aluminum foams under impact loads and shock.
21. *Zaretsky, E. and Ben-Dor, G.*, Compressive stress-strain relations and shock Hugoniot curves of flexible foams, *Trans. ASME, J. Eng. Mater. Tech.*, Vol. 117, pp. 278–284. 1995.
22. *Thornton, P.H. and Magee, C.L.*, *Metal Trans.*, Vol. 6A, p. 1253, 1975.
23. *Niebyliski, L.M. and Fanning, R.J.*, *SAE Trans.*, Vol. 81, p. 1676, 1973.
24. *Gibson, L.J. and Ashby, M.F.*, *Cellular Solids: Structures and Properties*, 2nd Ed. Cambridge University Press, Cambridge, 1997.
25. *Lu, T.J., Stone, H.A. and Ashby, M.F.*, *Acta Mater.*, Vol. 46, p. 3619, 1998.
26. *Koch, A. et al*, *Proc. 4th Int. Conf. on Aluminum Alloys*, Ed. T.H. Sanders Jr., Georgia Inst. Tech., Atlanta, GA, pp. 387–394, 1994.
27. *Deshpande, V.S. and Fleck, N.A.*, High Strain Rate Compressive Behavior of Aluminum alloy Foams, *Int.J. Impact Eng.* Vol. 24, pp. 277–298, 2000.
28. *Dannemann, K.A. and Lankford Jr, J.*, *Mater. Sci. Eng.*, Vol. A293, pp. 157–164, 2000.
29. *Paul, A. and Ramamurty, U.*, Strain rate sensitivity of a closed-cell aluminum foam, *Mater. Sci. Eng.*, Vol.A281, pp. 1–7, 2000.
30. *Mukai, T., Kanahashi, H., Miyoshi, T., Mabuchi, M., Nieh, T.G. and Higashi, K.*, Experimental Study Of Energy Absorption \riA Close-Celled Aluminum Foam Under Dynamic Loading, *Mater.*, Vol. 40, No. 8, pp. 921–927, 1999.
31. *Cady CM., Gray III G.T., Liu C, TrujiUo C.P., Jacquez B.L., and Mukai T.* *Proc. Shock Compression of Condensed Matter*, pp. 725–728, 2001.
32. *Schenker A. et al.*, Full Scale Field Tests of Concrete Slabs Subjected to Blast Load, to be presented in MABS 18, 2004.
33. *Jahsman, W. E.*, Static and Dynamic Material Behavior of Syntactic Foam, in *Mechanical Behaviour of Materials Under Dynamic Loads*, Ed. U.S. Lindholm, pp. 365–387, Springer-Verlag, 1968.

34. *Zaretsky, E. and Ben-Dor, G.*, Compressive stress-strain relations and shock Hugoniot curves of flexible foams, *Trans. ASME, J. Eng. Mater. Tech.*, Vol. 117, pp. 278–284, 1995.

35. *Reid S.R. and Peng C.*, Dynamic Uniaxial Crushing of Wood, *Int. J. Impact Eng.*, Vol. 19, Nos. 5–6, pp. 531–570, 1997.

36. NC State: Composite metal foam withstands high explosive round. 2017, www <https://texnomaniya.ru/penometall-okazalsya-ustoiyichivim-k-vzrivu-i-oskolkam>

37. *Мишуев А.В. Казеннов В.В., Громов Н.В.*, Патент на изобретение № 2334332 Устройство защиты электрического трансформатора от взрыва и пожара при коротком замыкании Приоритет изобретения 19.04.2007 г., Отчет МГСУ.ОИВТ РАН «Разработка экспериментальной установки для проведения комплексных исследований на взрывобезопасность и взрывозащитность ВМЭО при использовании энергии взрыва. 2009.

38. *A. Reyes et. al.* / *European Journal of Mechanics A/Solids* 22 (2003) 815–835.

39. *И.А. Бургер, Р.П. Мавлютов.* Сопротивление материалов: Учебное пособие. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 19810. – 560 с.

40. Overcoming of Barrier between CAD and CFD by Modified Finite Volume Method / *Aksenov, A. A., Dyadkin, A.A., Pokhilko, V.I.* // Proc. of “1998 ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference”, San Diego, ASME PVP – 1998, Vol. 377.

41. *A. Schenker, I. Anteby, E. Nizri, B. Ostrach, Y. Kivity, O. Sadot, O. HahamI, R. Michaelis, O. E. Gal, G. Ben-Dor* Foam-Protected RC Structures under Impact: Experimental and Numerical Studies // *ASCE Journal of Structural Engineering*, 131(8), 1233–1242, 2005.

42. *Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П.* Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. Москва: Физматгиз, 1963.

43. *Милявский В.В.* Эмпирическая формула для оценки параметров ударного сжатия пористого вещества // *Теплофизика высоких температур*, 2000, т.38, №2, с. 232–241

44. *Victor Golub, Olga Mirova.* Shock Waves in Granular Media // *Shock Wave Science and Technology Reference Library*, 2007, Part III, P. 325–351.

45. *Herrmann W.* Constitutive Equation for the Dynamic Compaction of Ductile Porous Materials // *J. of Appl. Phys.* 1969. V. 40. N 6. P. 2490.

46. *Dijken D.K., De Hosson J.Th.M.* Shock wave equation of state of powder material // *J. Appl. Phys.* 1994. V. 75. N 2. P. 809.

47. *Dijken D.K., De Hosson J.Th.M.* Thermodynamic model of the compaction of powder materials by shock waves // *J. Appl. Phys.* 1994. V. 75. N 1. P. 203.

48. *Trunin R.F., Zhernokletov M.V., Simakov G.V., Gudarenko L.F. and Gushchina O.N.* Shock compression of highly porous samples of Copper, Iron, Nickel and their equation of state // *Shock Compression of Condensed Matter – 1997. AIP Conference Proceedings* 429. Woodbury, New York. P. 83.

49. *Гейдон А., Гёрл И.*, Ударная труба в химической физике высоких температур» «Мир», Москва, 1966.

50. *Гальбурт В.А.* Взрывные гидродинамические течения. Методика расчета. Изд.: ИВТ АН СССР. 1983.

51. *Седов Л.И.* Методы подобия и размерности в механике. Москва 1981.
52. *Козорезов К.И., Сергеев В.В.* Расчет параметров ударной волны вблизи заряда взрывчатого вещества ВВ. ФГВ. – 1975, № 6. С. 928–938.
53. *Васильев А.А., Ждан С.А.* Параметры ударной волны при взрыве цилиндрического заряда ВВ в воздухе. ФГВ. – 1981, № 6. С. 99–105.
54. *Адушкин В.В.* О формировании ударной волны и разлете продуктов взрыва в воздухе. ПМТФ. – 1963, № 5, С. 107–114.
55. *Цикулин М.А.* Воздушная ударная волна при взрыве цилиндрического заряда большой длины. ПМТФ. – 1960, №3. С. 53–67.
56. *Р.А. Липштейн, М.И. Шахнович.* Трансформаторное масло. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1983.
57. Межгосударственный стандарт. ГОСТ 982–80. Масла трансформаторные. Технические условия. Дата введения 01.01.82.
58. НПО РОСТЕХЭНЕРГО, www.npo64.ru/transformatornoe-maslo/.
59. Научно-производственное предприятие «Региональная энергетическая компания», www.rec21.ru/index.htm классификатор продукции ОК 005–93, Москва, ИПК Издательство стандартов, 2000.
60. Сайт «Электрические сети», <http://leg.co.ua/>.
61. АО «фирма по наладке, совершенствованию технологии и эксплуатации электростанций и сетей ОРГРЭС». Методические указания по эксплуатации трансформаторных масел. РД 34.43.105–89. Москва 1995.
62. Сборник распорядительных материалов по эксплуатации энергосистем. Электротехническая часть. Издание пятое, переработанное и дополненное. Часть 2. Раздел 7 Трансформаторы. Утверждено Департаментом научно-технической политики и развития РАО «ЕЭС России» 27.06.2002 г.
63. Отчет о научно-исследовательской работе. Совершенствование взрывобезопасности и взрывозащищенности высоковольтного масляного электрооборудования ОАО «ФСК ЕЭС». Расчетно-теоретические исследования. Этап 1. ОИВТ РАН, Москва, 2008.

ГЛАВА 10. ДЕМПФЕРНЫЕ СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ВМЭО НА ОСНОВЕ ГАЗОЖИДКОСТНЫХ СИСТЕМ

В высоковольтных маслонаполненных трансформаторах используется трансформаторное масло, которое является практически несжимаемой жидкостью, поэтому возмущения, вызываемые коротким замыканием в межвитковой области, приводящие к образованию электрической дуги и высокотемпературного ядра горячей плазмы со скоростью звука в жидкости передаются на корпус трансформатора и приводят к его разрушению. В предыдущей главе рассмотрены демпферные системы защиты корпуса высоковольтного трансформатора. В настоящей главе мы рассматриваем другие демпферные системы, которые основаны на модификации свойств среды, через которую распространяются возмущения. Из теории и экспериментов газожидкостных систем [1–2] известно, что малая добавка газа в жидкость существенно изменяет сжимаемость среды и характер распространения ударных волн. Таким образом, если в жидкость ввести малую объемную долю газа (менее 0,1 %), то среда станет сжимаемой, кроме того, будет показано, что газожидкостная среда является сильно дисперсионной. Все эти свойства – сжимаемость и дисперсионность приводят к тому, что возникают ударные волны, которые «размазываются» и их воздействие на корпус существенно уменьшается по сравнению с ударными волнами в жидкости. Для эффективности использования такой среды необходимо, чтобы она имела высокую электрическую прочность. Поэтому целесообразно рассмотреть в качестве добавки газ высокой электрической прочности, например, элегаз SF₆. В главах 2 и 3 представлены результаты исследования электрофизических свойств трансформаторного и растительного масла, там же приведены данные по газообразованию, которое зачастую связано с образованием микропузырьков. Возникает необходимость изучения газожидкостных систем и возможности их использования в системах защиты высоковольтного маслонаполненного электрооборудования или они могут найти применение в различных элементах высоковольтного оборудования, а также плазменных технологиях с использованием газожидкостных систем. Нами были проведены исследования по ударным волнам в газожидкостных средах и электрической прочности трансформаторного масла с малыми добавками элегаза и воздуха [11–13]. Предложение об использовании газожидкостных систем для защиты высоковольтных трансформаторов было запатентовано и был создан макетный образец высоковольтного трансформатора, были проведены испытания совместно с Федеральной сетевой компанией ФСК ЕЭС. Результаты фундаментальных и прикладных исследований по демпферным газожидкостным системам изложены в настоящей главе.

10.1 МЕТОДЫ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ МНОГОФАЗНЫХ СРЕД

В настоящем разделе представлен обзор существующих физико-математических подходов, применяемых для описания газожидкостных дисперсных потоков с химическими реакциями. Для каждого подхода приводятся базовые физические представления, на которых он основан.

Многофазные среды получили большое распространение во многих современных технологиях, которые нашли применение в двигателях внутреннего сгорания, авиационных и ракетных двигателях и в системах охлаждения ядерных реакторов. Многофазные среды широко распространены, например: двигатели в машинах создают газозвесь, которая или поджигается искрой или сжимается до самовоспламенения; в реактивные двигатели добавляют частицы алюминия для интенсификации горения; в химической промышленности используются колонны тарельчатого типа, на сетчатых тарелках которых происходит барботаж жидкости для увеличения площади взаимодействия фаз; аппараты с перемешиванием применяются для создания эмульсий с той же целью; взаимодействие твердого катализатора с жидкостью или газом; пленочные химические реакторы; использование ПАВ, гетерогенная детонация, адсорбция и десорбция. В результате проведенных исследований во многих областях многофазных сред разработаны теоретические методы описания явлений, которые в большом количестве статей и монографий с достаточно хорошей точностью описывают исследуемое явление. Методы математического описания газожидкостных сред включают как пределы низких объемных концентраций, так и задачи с высоким газосодержанием. Последний случай важен для моделирования процессов на развитой стадии взрыва в трансформаторах, когда объемная доля газовой фазы может быть высокой.

10.1.1. Метод фазовых индикаторов

Следуя работе [3], рассмотрим ансамбль из N сферических пузырьков в полидисперсном пузырьковом потоке, их расположение задается функцией $C^N(t)$, которая однозначно описывает систему в момент времени t . Для математического описания ансамбля в определенный момент времени вводится вероятностная функция $P(C^N; t) \equiv P(N; t)$:

$$P(N; t) dC^N \equiv P(N, t) d^3 y^{(1)} dR^{(1)} dR_0^{(1)} d^3 \omega^{(1)} d\dot{R}^{(1)} \times \dots \times d^3 y^{(N)} dR^{(N)} dR_0^{(N)} d^3 \omega^{(N)} d\dot{R}^{(N)},$$

где y – координата центра пузырька, $R^{(i)}$ – относительный радиус пузырька, определяемый по нормальному распределению, $R_0^{(i)}$ – осредненный радиус пузырька, $W^{(i)}$ – скорость пузырька, $\dot{R}^{(i)}$ – скорость деформации межфазной поверхности. Интегрируя все переменные, по всему диапазону получим нормировочное выражение:

$$\int dC^N P(N; t) = N!.$$

Плотность пузырьков в единице объема выражается следующим образом [3, 4]:

$$n(y, t) = \int dR dR_0 d^3 \omega d\dot{R} P(1; t).$$

Считая, что P – исчезает при интегрировании, можно записать уравнение сохранения пузырьков:

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \nabla \cdot (n \mathbf{W}) = 0,$$

где \mathbf{W} – средняя скорость пузырьков, в случае нулевого значения скорости проскальзывания $\mathbf{W} = \mathbf{u}$ ($\tilde{\mathbf{W}}$ – мгновенное значение скорости пузырьков).

$$\mathbf{W}(y, t) = \frac{1}{n(y, t)} \int dR dR_0 d^3 \omega d\dot{R} P(1; t) \tilde{\mathbf{W}}.$$

Запишем фазовый индикатор дисперсной фазы [10.7]:

$$\alpha_{\text{дисп}}(x; N) = \sum_{i=1}^N H(R^{(i)} - |x - y^{(i)}|),$$

где $H(x)$ – функция Хевисайда, тогда индикатор несущей фазы задается выражением $\alpha_{\text{несущ}}(x; N) = 1 - \alpha_{\text{дисп}}(x; N)$.

Запишем объемную долю каждой фазы, через вероятностную функцию:

$$\varphi_{\text{несущ}} = \frac{1}{N!} \int dC^N P(N; t) \alpha_{\text{несущ}}(x; N),$$

$$\varphi_{\text{дисп}} = \frac{1}{N!} \int dC^N P(N; t) \alpha_{\text{дисп}}(x; N).$$

Окончательное выражение для объемной доли получается подстановкой выражения для фазового индикатора:

$$\varphi_{\text{дисп}} = 1 - \varphi_{\text{несущ}} = \int dR \int_{|x-y| \leq R} d^3 y \int dR_0 d^3 \omega d\dot{R} P(1; t).$$

Запишем уравнения изменения несущей и дисперсной фазы:

$$\frac{\partial \phi_{\text{несущ}}}{\partial t} + \nabla \cdot (\phi_{\text{несущ}} \langle \mathbf{u}_{\text{несущ}} \rangle) = \phi_{\text{несущ}} (\nabla \cdot \langle \mathbf{u}_{\text{несущ}} \rangle),$$

где $\langle \mathbf{u}_{\text{несущ}} \rangle$ – скорость несущей фазы.

$$\frac{\partial}{\partial t} (n \bar{\phi}) + \nabla \cdot (n \bar{\phi} \mathbf{W}) = n \left(\frac{\partial \phi^{(1)}}{\partial t} \right)$$

где $\bar{\phi}$ – средняя по ансамблю функций $\phi^{(i)}(N; t)$, каждая из которых однозначно характеризует отдельный пузырек

$$\bar{\phi}(x, t) = \frac{1}{n} \int dR^{(1)} dR_0^{(1)} d^3 \omega^{(1)} d\dot{R}^{(1)} P(1; t) \phi^{(1)}(1; t).$$

Законы сохранения.

Уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0,$$

где ρ – плотность смеси.

Уравнение движения:

$$\frac{\partial \rho \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u} + p_{\text{несущ}} \mathbf{I}) = \nabla \cdot \left[\alpha_{\text{несущ}} \left(\rho_l - \frac{\overline{R^3}}{R^3} - \rho \frac{\overline{R^3 \dot{R}^2}}{R^3} \right) \right].$$

Уравнение движения одиночного пузыря [10.5] записывается как:

$$\dot{\mathbf{R}} = \frac{\partial \mathbf{R}}{\partial t} + \mathbf{W} \cdot \nabla R - \frac{1}{n} \nabla \cdot \left[n(\mathbf{R} \dot{\mathbf{W}} - \overline{\mathbf{R} \dot{\mathbf{W}}}) \right],$$

$$\ddot{\mathbf{R}} = \frac{\partial \dot{\mathbf{R}}}{\partial t} + \mathbf{W} \cdot \nabla \dot{\mathbf{R}} - \frac{1}{n} \nabla \cdot \left[n(\dot{\mathbf{R}} \mathbf{W} - \overline{\dot{\mathbf{R}} \mathbf{W}}) \right].$$

Для замыкания системы уравнений необходимо выразить $\overline{\varphi}(x, t)$, через осредненный радиус R_0 :

$$\overline{\varphi}(x, t) = \int_0^{\infty} \varphi(x, t; R_0) f(R_0) dR_0,$$

где $f(R_0)$ удовлетворяет выражению $\int_0^{\infty} f(R_0) dR_0 = 1$.

Данный метод не накладывает ограничения на объемную долю дисперсной фазы, не содержит полуэмпирических замыкающих уравнений.

10.1.2. Метод взаимопроникающих континуумов

К первым работам, в которых был сформулирован пространственно-осредненный подход описания дисперсных сред, относятся [8–10]. В работе [9] получены интегральные и дифференциальные уравнения сохранения для описания двухфазной многокомпонентной монодисперсной системы с химическими реакциями, в которой протекают процессы тепло- и массообмена. В работе [9] рассматриваются химические, диффузионные и тепловые процессы, протекающие в многофазных многокомпонентных дисперсных средах. Основные допущения модели следующие: фазы представляют собой гомогенные смеси; расстояния, на которых параметры течения изменяются, существенно много больше характерных размеров неоднородностей, или дисперсных включений, поверхности разрыва рассматриваются отдельно; в пределах каждой фазы существует локальное равновесие; механическим взаимодействием между дисперсными частицами можно пренебречь.

В общем случае для каждой фазы рассматривается сумма внешнего тензора деформации и набора некоторых тензоров, учитывающих смещение вещества за счет взаимодействия с другой фазой, в случае жидких или газообразных включений; условия совместного движения определяются объемным содержанием фаз. Для газожидкостной системы силовое взаимодействие между фазами учитывает воздействие поля давления на включения (архимедова сила) и различие скорости между фазами.

Модель не учитывает особенности поверхностного слоя вещества толщиной порядка радиуса молекулярного взаимодействия, находящегося на границе раздела фаз; не учитываются мелкомасштабные явления, сравнимые с размерами включений (пульсационные течения вокруг пузырьков, эффект присоединенной массы), взаимное влияние дисперсных включений.

Для замыкания получившейся системы уравнений в работе Р.И. Нигматуллина [10], продолжающей [9], используются дополнительные свойства фаз – энергетические переходы при фазовых превращениях, учет равновесных характеристик многокомпонентных систем, определение кинетических параметров.

Для учета энергии, затраченной на фазовый переход, вводятся аккомодационные соотношения, в которых используются парциальные удельные энтальпии компонентов фаз при равновесии. В случае неидеальной жидкости или газа для их определения вводятся дополнительные соотношения, использующие значения физико-химических свойств чистых компонентов и экспериментальных данных по равновесию бинарных смесей компонентов. Производство энтропии учитывается при помощи феноменологических уравнений, в которых кинетические коэффициенты определяются из эксперимента.

В результате получается замкнутая система уравнений, позволяющая учитывать такие перекрестные эффекты, как влияние на величину диффузионных и тепловых потоков относительного движения фаз, влияние на поток тепла между фазами движущих сил межфазного переноса массы и химического превращения, влияния на скорость транспорта вещества компонента между фазами движущей силы межфазного переноса, влияние на массообмен между фазами температурной неравновесности фаз. Сила межфазного переноса считается состоящей из трех частей: разности потенциалов Планка, переноса энтальпий компонентов и скорости неравновесности между фазами. Система уравнений для описания процессов, протекающих в дисперсных средах с явлениями тепло- и массопереноса при протекании химических реакций, выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} \rho_1 c_{p1} \frac{d_1 T_1}{dt} &= \nabla(\lambda_{11} \nabla T_1) - \lambda_{12} (T_1 - T_2) - \sum_{k=1}^n \sum_{r=1}^N i_{1k} v_{k(1r)} I_{(1r)} - \sum_{k=1}^n J_{k(21)} (i_{1k} - i_{1k,s}) + \\ &\sum_{k=1}^n J_{k(21)} (i_{1k} - i_{1k,s}) + \chi_1 k_{1f} (v_2 - v_1)^2; \\ \rho_2 c_{p2} \frac{d_2 T_2}{dt} &= \nabla(\lambda_{22} \nabla T_2) - \lambda_{12} (T_1 - T_2) - \sum_{k=1}^n \sum_{r=1}^N i_{2k} v_{k(2r)} I_{(2r)} - \sum_{k=1}^n J_{k(21)} (i_{2k} - i_{2k,s}) + \\ &\sum_{k=1}^n J_{k(12)} (i_{2k} - i_{2k,s}) + \chi_2 k_{2f} (v_2 - v_1)^2; \end{aligned}$$

$$\rho_1 \frac{d_1 c_{1k}}{dt} = \nabla \left(\sum_{l=1}^{n-1} D_{1(kl)} \nabla c_{1l} \right) + J_{k(21)} - J_{k(12)} + \sum_{r=1}^N v_{k(1r)} I_{(1r)} - c_{1k} (I_{(21)} - I_{(12)})$$

$$(k = 1, 2, \dots, n-1);$$

$$\rho_2 \frac{d_2 c_{2k}}{dt} = \nabla \left(\sum_{l=1}^{n-1} D_{2(kl)} \nabla c_{2l} \right) + J_{k(12)} - J_{k(21)} + \sum_{r=1}^N v_{k(2r)} I_{(2r)} - c_{2k} (I_{(12)} - I_{(21)})$$

$$(k = 1, 2, \dots, n-1).$$

Уравнения получены в результате пренебрежения работой массовых сил, диссипацией работы вязких сил в тепло, влиянием внешних источников тепла и градиентов давления, а также диссипацией механической энергии межфазных потоков массы в тепло. Полученная система уравнений является результатом феноменологического подхода к описанию движения взаимопроникающих континуумов. Сложность при реализации данного подхода заключается в большом количестве данных о межфазном взаимодействии газа и жидкости (перенос тепла, межфазные скорости, фазовые переходы), которые необходимо определить экспериментально.

10.1.3. Гомогенная модель газожидкостных дисперсных сред

Гомогенная модель [2] является достаточно наглядным и удобным способом континуального представления двухфазной среды, в частности, газо- или парожидкостной смеси, находящейся в пузырьковом режиме. С помощью этой модели начиная с 1980-х годов получено большое количество результатов и эта модель является одной из основных при интерпретации явлений в многофазных средах. Ввиду важности модели мы будем придерживаться ее описания в соответствии с работами Накорякова В.Е. и его школы [2]. Смесь жидкости и газа в данной модели рассматривается как однородная среда со средней температурой T , скоростью u , плотностью ρ и давлением p . Предполагается, что давление в жидкой фазе p_1 либо равно давлению в газовой фазе p_2 , либо отличается на величину лапласовского давления $\Delta p = 2\sigma/R_b$, где R_b – радиус пузырьков, σ – коэффициент поверхностного натяжения. Здесь и далее индекс 1 означает жидкую фазу, индекс 2 – газ (пар). Основным предположением этой модели является быстрый обмен импульсом, теплом и массой между фазами. Вследствие этого температуры и скорости движения фаз равны. Если считать, что газовая фаза состоит из пузырьков одного размера, а количество пузырьков N на 1 кг массы смеси не меняется в течение процесса, то удельный объем газа в смеси $v_g = \frac{4}{3}\pi R_b^3 N$, м³/кг. Искомое объемное газосодержание φ по определению связано с v_g и плотностью среды ρ так: $\varphi = \frac{v_g}{v} = v_g \rho$. Иногда φ определяется по-другому: $\varphi = \frac{4}{3}\pi R_b^3 n$, где $n = N/V$ – количество пузырьков в единице объема, в отличие от N величина n не является постоянной. Массовое газосодержание X определим через φ и плотность газа: $X = v_g \rho_2 = \varphi \rho_2 / \rho$. В отличие от φ массовое газосодержание в случае, если отсутствуют фазовые переходы, в волне не меняются.

Средняя плотность смеси вводится через объемное газосодержание φ соотношением:

$$\rho = \rho_1(1 - \varphi) + \rho_2\varphi \quad (10.1)$$

или через массовое газосодержание X :

$$1/\rho = (1 - X) / \rho_1 + X / \rho_2 = (1 - X) / \rho_1 + v_g. \quad (10.2)$$

Так как $\rho X = \varphi \rho_2$, то, исключив из уравнения (10.1) ρ , можно найти связь между φ и X :

$$X = \frac{\rho_2 \varphi}{\rho_2 \varphi + \rho_1(1 - \varphi)}.$$

Из соотношения (10.2) можно получить полезное равенство, связывающее изменение плотности $\delta\rho$ с изменением объема газа ΔV

$$\Delta V/V = \frac{\delta\rho(1-\varphi)^2(1-X)}{a_1^2\rho\varphi} - \frac{\delta\rho}{\rho\varphi}, \quad (10.3)$$

где c_1 – скорость звука в жидкости. Здесь использована акустическая связь между возмущениями плотности жидкости $\delta\rho_1$, и давления в среде δp : $\delta\rho_1 = \delta p/a_1^2$, возникшая в (10.2) после варьирования этого соотношения.

Таким образом, смесь пузырьков с жидкостью рассматривается как среда, плотность которого близка к плотности жидкости, а сжимаемость этой среды, как будет показано ниже, определяется сжимаемостью газовой или паровой фаз.

Определим также некоторые термодинамические характеристики этой смеси:

$$\text{энтропия } s = s_1(1 - X) + s_2X;$$

$$\text{энтальпия } h = h_1(1 - X) + h_2X.$$

10.1.2. Скорость звука

Скорость звука a в газожидкостной смеси без фазовых переходов определяется как скорость распространения малых возмущений слабых волн сжатия $a^2 = (\partial p / \partial \rho)_s$. Обратимся к соотношению (10.2). Продифференцируем его по переменной p . При этом будем считать, что $\partial\rho/\partial p = a^{-2}$; $\partial\rho_1/\partial p = a_1^{-2}$; $\partial\rho_2/\partial p = a_2^{-2}$.

Тогда из (10.2) следует:

$$\frac{1}{a^2} = \frac{(1-X)\rho^2}{\rho_1^2} \frac{1}{a_1^2} + \frac{\rho^2 X}{\rho_2^2 a_2^2}. \quad (10.4)$$

Заметим, что $\rho/\rho_1 \approx (1 - \varphi)$. Выразив X через φ во втором слагаемом правой части (10.4) (в первом можно X пренебречь по сравнению с единицей), получим:

$$a^{-2} = \rho \left(\frac{\varphi}{\rho_2 a_2^2} + \frac{1-\varphi}{\rho_1 a_1^2} \right). \quad (10.5)$$

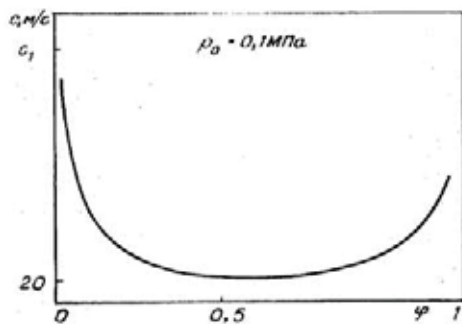


Рис. 10.1. Зависимость скорости звука a в смеси от газосодержания φ

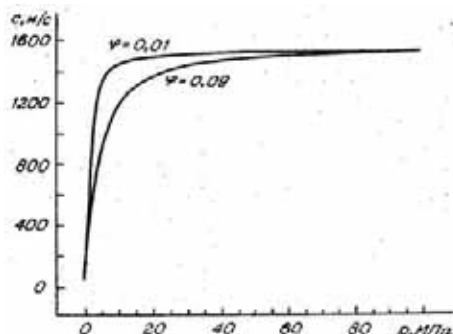


Рис. 10.2. Зависимость скорости звука a от амплитуды давления p

На рис. 10.1 приведена зависимость скорости звука (10.5) от газосодержания φ . При $\varphi \approx 10^{-3}$ скорость c из (10.5) определяется формулой Мэллока:

$$a_M^2 = \frac{\rho_2}{\rho_1} \frac{a}{\varphi(1-\varphi)} = \frac{\gamma p}{\rho \varphi}, \quad (10.6)$$

где γ – показатель адиабаты газа. Формула (10.6) указывает, что сжимаемость смеси определяется в основном сжимаемостью газовой фазы. Бесконечно малые возмущения распространяются со скоростью c_0 , которая получается из (10.6) при $p = p_0$, $\rho = \rho_0$ и $\varphi = \varphi_0$, где индекс 0 означает начальное состояние. Формула (10.6) с ростом p дает интенсивное возрастание скорости a_M и при $p \approx 10$ МПа a_M превышает скорость звука в жидкости.

В этом случае формулой (10.6), естественно, пользоваться нельзя, а надо рассчитывать c исходя из формулы (10.5), которую можно представить так: $a^{-2} = a_1^{-2}(1-\varphi)^2 + a_M^{-2}$ или приближенно

$$a^2 = a_1^2 a_M^2 / (a_1^2 + a_M^2). \quad (10.7)$$

Из (10.7) видно, что с ростом C_M общее выражение для c ограничено величиной c_1 , а при $a_1 \gg a_M$ значение a ограничено a . На рис. 10.2 приведена зависимость a от p . На начальном участке зависимости наблюдается резкий рост a , что свидетельствует о высокой сжимаемости и нелинейности среды.

В парожидкостной смеси, находящейся на линии насыщения, возможен другой механизм распространения возмущений – за счет изменения паросодержания при изменении давления. В отличие от описанного выше случая, когда значение φ менялось за счет сжатия пузырька, в случае парожидкостной среды φ может меняться за счет фазовых переходов. В этом случае $(\partial p / \partial \rho)_s = a^2$ можно вычислить из (10.2), считая, что с изменением p меняется только X , а ρ_1 и ρ_2 от p не зависят:

$$\left(\frac{\partial p}{\partial p}\right)_s = -\rho^2(1/\rho_2 - 1/\rho_1) \left(\frac{dX}{dp}\right)_s \quad (10.8)$$

и задача сводится к вычислению $(\partial X / \partial p)$. Для вычисления этой производной воспользуемся некоторыми термодинамическими соотношениями. Энтродпия смеси в области влажного пара определяется двумя независимыми параметрами. Вблизи линии насыщения можно принять за независимые параметры массовое паросодержание X и температуру T . В рамках данной модели температуры фаз равны. Тогда

$$ds_1 = \left(\frac{\partial s}{\partial T}\right)_X dT + \left(\frac{\partial s}{\partial X}\right)_T dX. \quad (10.9)$$

Из определения энтропии следует, что

$$\left(\frac{\partial s}{\partial T}\right)_X = X \left(\frac{\partial s_2}{\partial T}\right) + (1 - X) \left(\frac{\partial s_1}{\partial T}\right).$$

Для жидкости, находящейся на линии насыщения $ds_1/dT = C_1/T$, а для насыщенного пара $ds_2/dT = c_2/T$, где c_1 и c_2 – удельные теплоемкости жидкости и газа, соответственно. Тогда

$$\left(\frac{\partial s}{\partial T}\right)_X = [Xc_2 + (1 - x)c_1]/T = c_*/T. \quad (10.10)$$

Физический смысл c_* – количество теплоты, необходимое для повышения температуры 1 кг смеси на 1 К при сохранении степени сухости.

Рассмотрим выражение

$$\left(\frac{\partial s}{\partial X}\right)_T = s_2 - s_1 = L/T, \quad (10.11)$$

где L – удельная теплота парообразования. Для адиабатического процесса, когда $ds = 0$, из (10.9) с учетом (10.10)–(10.11) имеем:

$$(c_*/T)dT + (L/T)dX = 0. \quad (10.12)$$

Давление и температура в области влажного пара связаны соотношением Клапейрона-Клаузиуса

$$\frac{dp}{dT} = \frac{L}{T(1/\rho_2 - 1/\rho_1)}. \quad (10.13)$$

Уравнение (10.12) с учетом (10.13) принимает вид:
 $(c_*/L)(1/\rho_2 - 1/\rho_1)dp + (L/T)dX = 0$.

Отсюда

$$(dX/dp)_s = -(c_*T/L^2)(1/\rho_2 - 1/\rho_1) \quad (10.14)$$

Разность теплоемкостей сухого пара и воды на линии насыщения $c_2 - c_1 = dL/dT - L/T$. Тогда $c_* = c_1 + X(dL/dT - L/T)$, в области, далекой от критической, $c_1 \approx c_{p1}$, поэтому

$$c_* = c_{p1} + X \left(\frac{dL}{dT} - \frac{L}{T} \right) \approx c_{p1} - X \frac{L}{T}. \quad (10.15)$$

Подставляя (10.14) в (10.8), получим $\left(\frac{\partial \rho}{\partial p} \right)_s = \frac{\rho^2 c_* T}{\rho_2^2 L^2}$. Воспользовавшись предположением, что пар является идеальным газом, т.е. $p_2/p_2 = RT$, где R – удельная газовая постоянная пара или газа, получим

$$\left(\frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_s = \frac{p_2^2 L^2}{\rho^2 R^2 T^3}, \quad (10.16)$$

где c_* определяется по формуле (10.15). Заменяя приближенно $\rho = \rho_1(1 - \varphi) \approx \rho_1$, $c_* = c_{p1}$ и $p_2 = p$, получим

$$c_2 = pL/\rho_1 \sqrt{c_{p1} T RT}, \quad (10.17)$$

иногда называемой термодинамически равновесной.

10.1.3. Распространение малых возмущений и нелинейных волн

Уравнения гомогенной модели строятся по аналогии с гидрогазодинамической однофазной среды [2] и могут быть представлены в виде:

$$\left. \begin{aligned} \partial \rho / \partial t + \partial(u\rho) / \partial x &= 0; \\ \partial u / \partial t + u \partial u / \partial x &= -(1/\rho) \partial p / \partial x; \end{aligned} \right\} \quad (10.18)$$

$$\partial h / \partial t + u \partial h / \partial x = (1/\rho) (\partial p / \partial t + u \partial p / \partial x). \quad (10.19)$$

Здесь u , ρ , p , h – возмущение скорости, плотность, давление и энтальпия смеси.

Изучение распространения малых возмущений проводится на основе линеаризации системы (10.18)–(10.19) с учетом предположения об адиабатичности процесса

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x}; \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} = -\rho_0 \frac{\partial u}{\partial x}; \quad \text{или} \quad \frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 p}{\partial x^2}; \quad (10.20)$$

$$ds/dt = 0.$$

$$\left(\frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_s = \frac{\gamma p_0}{\rho_0 \varphi_0} \quad (10.21)$$

Анализ распространения нелинейных волн и формирования ударных волн в газожидкостной среде на основе гомогенной модели, естественно, аналогичен традиционному газодинамическому подходу, но тем не менее

газожидкостная смесь обладает особенностью. Таким образом, гомогенная модель двухфазной среды это её представление в виде некоторой среды или континуум имеющую плотность жидкости, а сжимаемость газовой фазы. Следствиями высокой сжимаемости среды являются низкие значения скорости звука и высокая нелинейность, которая возникает из-за сильной зависимости $a = a(p)$ (см. рис. 10.2 на начальном участке роста p).

10.1.4. Ударные волны в газожидкостных средах

Газодинамический анализ скачков в рамках гомогенной модели в предположении, что ударные волны в жидкости с пузырьками газа существуют и являются изотермическими, был выполнен Кэмпбеллом и Питчером [18]. Они получили основные соотношения и экспериментально доказали существование ударных волн. Запишем законы сохранения массы и импульса на границе разрыва (рис. 10.3), опуская индекс «см»

$$\rho_1 u_1 = \rho_2 u_2; \quad p_1 + \rho_1 u_1^2 = p_2 + \rho_2 u_2^2. \quad (10.22)$$

Здесь индекс «1» относится к состоянию газожидкостной смеси до разрыва, «2» – после разрыва. Считая процесс сжатия пузырьков изотермическим, ищем $p_1 V_1 = p_2 V_2$. Учитывая, что $V = \varphi / \rho$, имеем

$$p_1 / p_2 = \phi_2 \rho_1 / \phi_1 \rho_2. \quad (10.23)$$

Заменив $u_2 = \rho_1 u_1 / \rho_2$ и подставив в закон сохранения импульса, запишем

$$u_1^2 = \frac{(p_2 - p_1) \rho_2}{\rho_1 (\rho_2 - \rho_1)}. \quad (10.24)$$

Предположив, что жидкость несжимаема, получим

$$p_2 - p_1 = \rho_1 (\phi_1 - \phi_2); \quad u_1^2 = \frac{(p_2 - p_1) \rho_2}{\rho_1^2 \phi_2 (\phi_1 / \phi_2 - 1)}. \quad (10.25)$$

Из уравнения изотермичности видно, что $\phi_1 / \phi_2 = (1 - \phi_1) \rho_2 / (1 - \phi_2) \rho_1$. Подставив в (10.25) и приняв, что $(1 - \phi_1) / (1 - \phi_2) \approx 1$, получим $u_1^2 (p_2 - p_1) \times \rho_2 \rho_1 / \rho_1^2 \phi_2 (p_2 - p_1)$. Приняв $1 - \phi_2 \approx 1$; $1 - \phi_1 \approx 1$ и произведя замену по (10.24), имеем

$$u_1^2 = p_2 / \phi_1 \rho_1, \quad (10.26)$$

где p_2 – полное давление за ударной волной. В случае, когда интенсивность ударной волны стремится к нулю, формула (10.26) переходит в выражение для квадрата скорости звука $a_0^2 = p_0 / \rho_0 \phi_0$. Соотношение (10.26), связывающее скорость ударной волны с интенсивностью скачка, называют формулой Кэмпбелла-Питчера и ею часто пользуются при газодинамическом анализе ударных волн в газожидкостных средах.

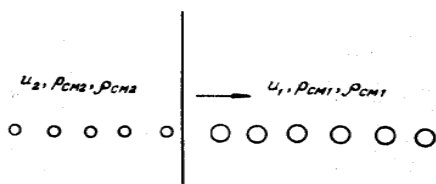


Рис. 10.3. Схема ударного разрыва в рамках гомогенной модели смеси

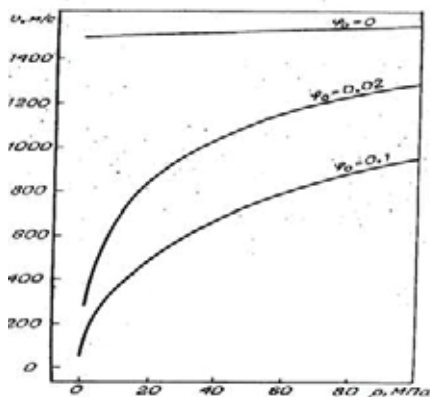


Рис. 10.4. Зависимость скорости ударной волны u от амплитуды давления p

В теории адиабатической ударной волны привлекается уравнение сохранения энергии, имеющее на разрыве следующий вид:

$$\frac{1}{2} u_1^2 + h_1 = \frac{1}{2} u_2^2 + h_2.$$

Изменение энтальпии смеси на фронте волны

$$h_2 - h_1 = \int_1^2 \left(\frac{dp}{\rho} + T ds \right). \quad (10.27)$$

Подробный анализ распространения ударных волн в пузырьковой среде с учетом эффектов дисперсии и диссипации можно найти в [2].

10.2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УДАРНЫХ ВОЛН В ГАЗОЖИДКОСТНЫХ ДИСПЕРСНЫХ СРЕДАХ

10.2.1. Описание экспериментальной установки

Из предыдущего следует, что скорость звука в воде с пузырьками воздуха может быть на порядок меньше, чем скорость звука в воздухе (рис. 10.1), поэтому влияние дисперсии уже можно наблюдать при обтекании цилиндра потоком смеси, состоящей из воды и пузырьков воздуха при скоростях потока от 35 м/с. Для определения скорости газожидкостной смеси при обтекании цилиндра был применен метод термоанемометрии [14]. В качестве зонда был выбран пленочный датчик DISA single normal (SN) по следующим причинам: во-первых, скорость потока выше 25 м/с; во-вторых, пленочный датчик обладает кварцевым покрытием, которое предотвращает образование пузырьков на его поверхности, обусловленное нагревом; в-третьих, пленочный датчик рекомендован для проведения измерений в двухфазных потоках рядом работ; в-четвертых, потерями на нагрев подложки пленочного датчика в воде можно пренебречь. Для наименьшего возмущения потока в качестве основного использовался конусный датчик, в качестве второстепенного (для выборочной проверки повторяемости эксперимента) использовался single normal. Свой-

ственное конусному датчику ослабление сигнала использовалось для усреднения данных о потоке, на выбор конусного датчика также повлияла его слабая чувствительность к примесям, содержащимся в потоке.

В качестве закона, связывающего скорость потока и энергию, затрачиваемую на нагрев пленки, используется закон Кинга. Закон Кинга для сверхзвукового течения микропузырьковой жидкости записывается в следующем виде: $E^2 = A + B\sqrt{\rho V}$, где E – напряжение, подаваемое на зонд термоанометра, A и B – калибровочные константы, ρ – плотность смеси, V – скорость смеси. Типичный перегрев сенсора был задан как 1,08. Для предотвращения флуктуаций температуры в ходе эксперимента использовалась незамкнутая система с постоянной подачей воды определенной температуры.

Экспериментально задача решалась при следующих значениях параметров. Спектр пузырьков до волны полной дисперсии логнормальный

$$f(R/R_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma(R/R_0)} \exp\left(-\frac{\ln^2(R/R_0)}{2\sigma^2}\right)$$

со значением стандартного отклонения $\sigma = 0,4$ (рис. 10.5 (а)) и объемным газосодержанием $\varphi = 0,5-0,85$. Для задачи обтекания цилиндра число Рейнольдса ГЖС $Re = \rho DU / \mu = 500-2000$, где $\rho = \rho_1(1 - \varphi) + \rho_2\varphi$ – плотность смеси (1 – жидкая фаза, 2 – газ), D – диаметр цилиндра, U – скорость ГЖС, μ – эффективная вязкость, которая определялась по газосодержанию; время релаксации пузырька $t \sim d^2 / \nu_{газа} = 5 \cdot (10^{-8} \div 10^{-6})$ с, где d – диаметр пузырьков (30–300 мкм), $\nu_{газа}$ – кинематическая вязкость газа; показатель адиабаты $k = c_p / c_v = 1,002$; $M = U / a = 1-2$ – число Маха ГЖС, a – скорость звука в ГЖС. Число Вебера в набегающем потоке ГЖС $We = 2d \rho_2^0 U^2 / \sigma$, где σ – коэффициент поверхностного натяжения.

Время дробления пузырька $\tau^* = \sqrt{\frac{\rho_{жидк} a^3}{\sigma} \left(\frac{We}{We^*}\right)^{3/2}} = [1 \div 50] \cdot 10^{-5}$ с, где критическое значение числа Вебера $We^* = 3\pi$. Время, за которое пузырек проходит волну полной дисперсии, $t \sim [1 \div 2] \cdot 10^{-4}$ с.

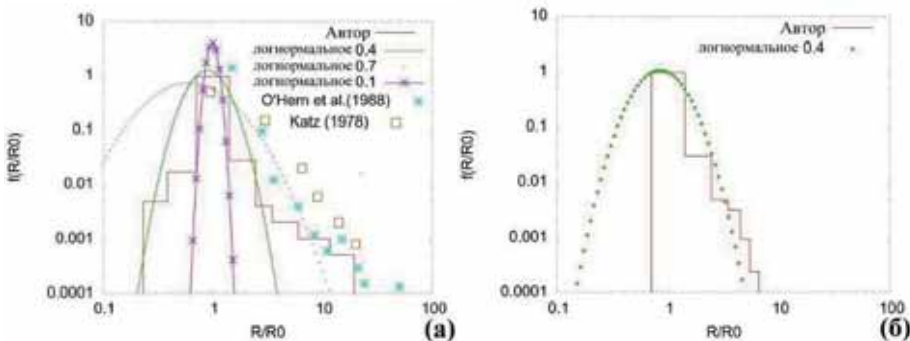


Рис. 10.5. а) нормальное распределение радиуса пузырьков до волны полной дисперсии. $R_0 = 90$ мкм, б) нормальное распределение пузырьков в волне полной дисперсии $R_0 = 30$ мкм

На рис. 10.6. приведена схема экспериментального стенда с описанием основных узлов и применявшегося диагностического оборудования.

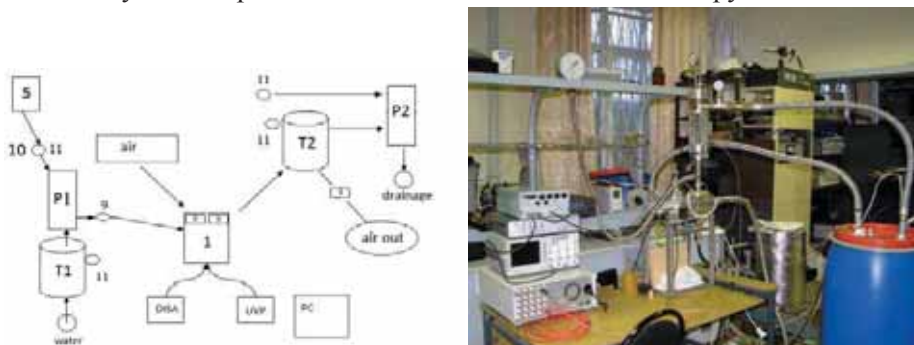


Рис. 10.6. Блок создания ГЖС, 1) – интегратор; 2) T1, T2–200-литровые герметичные емкости; 3) P1 – трехфазный насос (Grundfos CRT 2 с электродвигателем MG100LC4-D1); 4) P2 – однофазный насос (Grundfos MQ 3–45); 5) преобразователь частоты (ABB ACS550 ACS550–01–06A9–4); 6) AIR – регулируемая редуктором подача воздуха под давлением (от 1 атм до 12 атм); 7) DISA – термоанемометр DISA 55M10; 8) UVP – ультразвуковой профилометр скорости; 9) датчики: давления Honeywell MLH300PSB01A, температуры, расходомер воды, расхода газа Honeywell AWM720P1; 10) датчик контроля включения и выключения насоса; 11) система контроля уровня воды в емкостях и автоматического управления насосами

Блок создания ГЖС состоит из трех секций, выполненных из плексигла. В нижней секции создается смесь газа и жидкости при большом давлении, средняя секция предназначена для определения газосодержания смеси, из этой секции смесь через сопло подается в верхнюю – измерительную – секцию. В верхней секции проводятся измерения термоанемометром, скоростной камерой и ультразвуковым профилометром скорости (в воде). Основная идея получения сверхзвукового потока ГЖС состоит в том, что в нижней секции при высоком давлении размеры пузырьков малы и объемная доля газосодержания также мала, эту часть можно считать ресивером для следующей секции. Скорость звука ГЖС зависит от газосодержания, и при малом газосодержании она находится на падающей ветви соответствующей зависимости, истечение из этой части секции близко к звуковому для параметров ресивера. При попадании в следующую секцию (с атмосферным давлением) поток расширяется, происходит резкое увеличение газосодержания и скорость звука падает. При этом поток становится сверхзвуковым. Таким образом, в этой конструкции осуществляется переход ГЖС через скорость звука без применения сопла Лавала. Система мониторинга и управления позволяет проводить эксперимент в течение нескольких часов при постоянной температуре и количестве поглощенного воздуха.

Диагностическое оборудование. Значение перегрева пленочного зонда 1.08 поддерживалось при помощи моста DISA 55M10 и моста Dantec Dynamics Multichanel CTA 54N82 constant temperature anemometer (CTA) system. Частота выборки составляла 1 кГц, сигнал записывался напрямую в компьютер при помощи АЦП NI USB-9215A (BNC) 16-bit A/D converter. Длительность измерения в каждой точке составляла 60 с. Измерение температуры в ходе эксперимента проводилось термопарой (± 0.3 °C) (откалиброванной по ртутному термометру) и ртутным термометром (± 0.1 °C), коле-

бание температуры составляло не более 0,5 °С. Для определения давления использовался датчик давления Honeywell MLH300PSB01A, расход воздуха и жидкости определялся расходомерами.

Для визуализации волны полной дисперсии и калибровки термоанемометра использовалась система визуализации потока. В систему входили скоростные камеры Redlake MotionPro X3*, FOTRON Fastcam SA-4 и программное обеспечение DaVis (PIV La Vision) для обработки изображения.

Измерения параметров ГЖС.

1) *Газосодержание* определялось двумя способами – по расходу (рис. 10.3. (а)), максимальная погрешность определения объемного газосодержания 3 %) и по фотографиям. На рис. 10.7 (б) приведен пример для 50 % газосодержания в верхней секции (давление 1 атм) и 5 % в нижней (давление 12 атм). При определении газосодержания по расходу учитывался воздух, вытесняемый водой из емкости Т2 (на рис 10.6 (а) обозначен как Q).

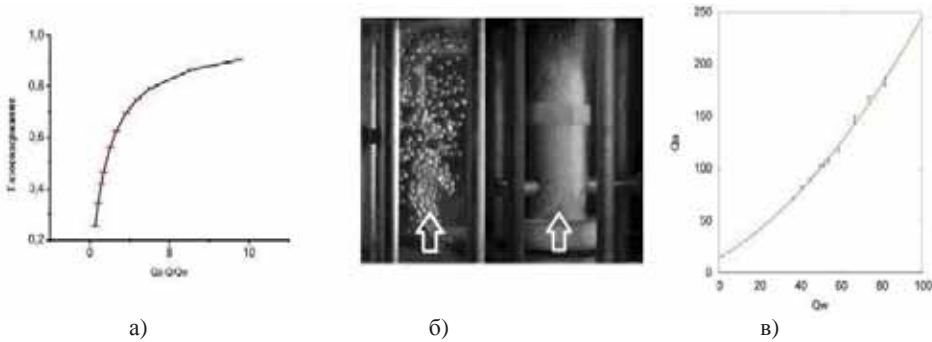


Рис. 10.7. а) зависимость газосодержания от отношения расходов жидкости и газа (погрешность 2–3 %); б) пример одновременной работы нижней (с высоким давлением) и верхней секции (погрешность 10–15 %). в) Зависимость расхода воздуха от расхода воды

В таблице 10.1 приведено сравнение двух методов определения газосодержания. При увеличении газосодержания метод определения газосодержания переставал работать из-за перекрытия одних пузырьков другими.

Таблица 10.1. Сравнение двух способов определения объемного газосодержания

Давление [атм]	7,6	8,9	7
Среднее количество пузырьков по 10 фотографиям	38,3	31,7	40,5
Газосодержание по фото	25,8	25	25,1
Газосодержание по объему	26	24	26

2) *Профиль скорости* при обтекании цилиндра определялся методом термоанемометрии. Для выяснения повторяемости эксперимента проводилось два типа проверок. Первый – при одинаковом газосодержании и скорости потока сравнительным анализом при перемещении зонда снизу вверх, спустя 10 минут – сверху вниз, и второй – повторением эксперимента через несколько дней и недель. На первом этапе эксперимента была определена скорость потока по массовым расходам газа и жидкости. Исходя из экспери-

ментальных данных, определенная таким способом средняя скорость ниже, чем скорость в центре потока, для учета этого факта была проведена калибровка. Результаты калибровки приведены на рис. 10.8.

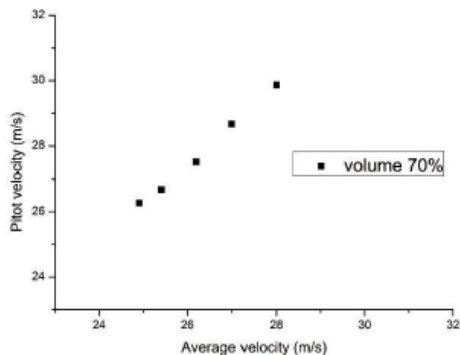


Рис. 10.8 Отношение между скоростью в центре секции и осредненной скоростью для смеси с газосодержанием 70%

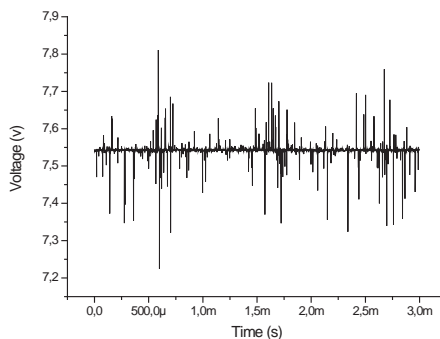


Рис. 10.9. Пример осциллограммы в волне полной дисперсии

На втором этапе был разработан способ обработки сигнала термоанемометра в волне полной дисперсии. Как показали измерения с помощью термоанемометра в волне полной дисперсии, при газосодержании $> 60\%$ по объему, сенсор находится в постоянном контакте (при выборке в 1МГц) с пузырьками различного диаметра. В результате амплитуда колебаний практически одинаковая на измеряемом участке, что позволяет использовать простое усреднение выходного сигнала термоанемометра (рис. 10.9).

При газосодержании ниже 40% по объему выходной сигнал моста сильно флуктуирует, что говорит о периодическом соприкосновении зонда с отдельными пузырьками газа, при этом газовая фаза лучше фиксировалась, чем выше перегрев зонда. При дальнейшем понижении объемного газосодержания до 20% (при этом увеличивался средний диаметр пузырьков) и при малых скоростях потока наблюдались U-образные мгновенные сигналы (U-shaped transient signal), поэтому при низких газосодержаниях простое усреднение неприменимо.

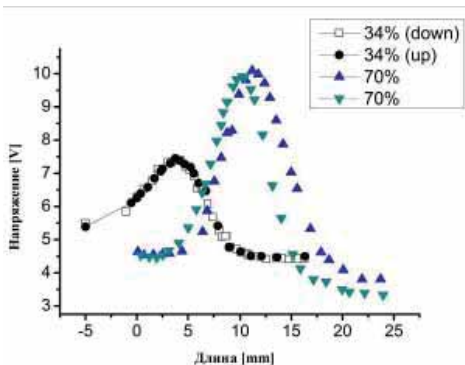


Рис. 10.10. Напряжение, измеренное термоанемометром (погрешность 1,5 %), качественно соответствующее профилю скорости потока

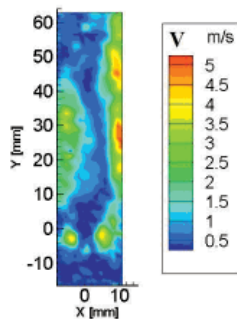


Рис. 10.11. Поле скоростей потока, полученное методом Granular PIV (погрешность 5–10 %)

На рис. 10.10 приведены данные для потока с 34 % газосодержанием, полученные при движении зонда вверх (up) и вниз (down) данные совпадают с точностью менее 1,5 %. Профиль скорости также определялся в секции с прямоугольным каналом методом Granular PIV (рис 10.11).

На основе экспериментальных работ рассмотрены особенности применения методики PIV к ГЖС и выбраны оптимальные параметры обработки фотографий (Overlap – 50 %, windows size – 32*32 и 16*16 pixel, no weighting function, correlation mode – cross-correlation. Image preprocessing – Subtract sliding background со значением 10) для получения полей скорости в измерительной секции. Для определения погрешности метода съемка производилась с различной экспозицией, погрешность измерения составила 5–10 %.

3) Для определения *скорости потока* под цилиндром была использована скоростная съемка (Fotron FASTCAM sa-4) в разгазированной воде с последующей обработкой фотографий методом PIV (La Vision). Вместо трассирующих частиц использовалось пузырьковое облако, возникавшее при резком перепаде давления воды. Для проверки полученных полей скоростей на адекватность обработке подвергались фотографии, полученные при различной экспозиции и скорости съемки. При этом приходилось использовать импульсные источники питания при малых выдержках. Это приводило к тому, что полученные фотографии были освещены с разной интенсивностью, в ходе предварительной обработки было подобрано значение High pass filter-10, которое дало наилучший результат при обработке этих изображений. Сравнивались поле скоростей, полученное при обработке нескольких фотографий при одинаковой интенсивности освещения (10–20 штук), и поле скоростей, полученное за половину времени длительности импульса, начиная с момента максимальной освещенности. Это значение High pass filter впоследствии применялось при обработке фотографий, полученных при постоянном освещении. Пространственные размеры изображения подбирались таким образом, чтобы захватить как можно больше частиц, но при этом фиксировать мелко-масштабные характеристики потока. Для получения поля скоростей в одной серии проводилось усреднение по 100 фотографиям. В случае постоянного освещения через произвольные промежутки времени выбирались 5 серий. В случае импульсного освещения ставилось 5 экспериментов. Итоговое поле скоростей получалось усреднением по 5 полученным сериям.

В работе не использовались трассирующие частицы, т.к., во-первых, спектр пузырьков по предварительным оценкам составляет от нескольких микрон до нескольких десятков микрон, и сложно будет разделить сигналы, подобная неоднородность также приведет к сильному возрастанию погрешности при использовании метода DDPIV, и затруднит его использование в принципе, т.к. неоднородность в спектре пузырьков заметна уже на нескольких мм по потоку; во-вторых, при большом газосодержании к пузырьковой среде применимо понятие плотной, и, исходя из этого, пузырьки заморожены в поток и их скорость соответствует скорости потока, по этой же причине затруднительно использовать PTV для построения 3D поля скоростей; в-третьих, для адекватного использования метода необходимо две камеры. Из-за непрозрачности среды приходилось использовать подсветку таким образом, чтобы свет отражался от пузырьков, но при этом не отсве-

чивал от стенок установки. На рис. 10.12 видно, что характерный диаметр струи – около 4 мм при диаметре сопла – 2 мм.

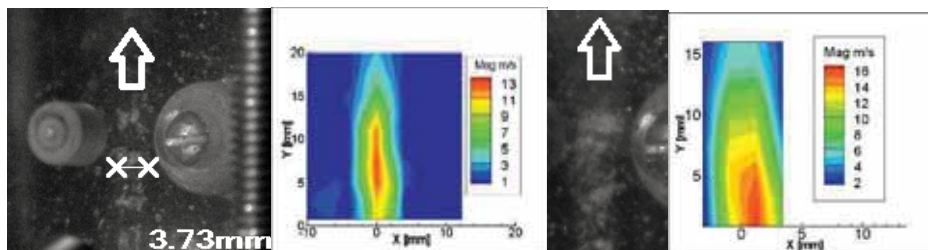


Рис. 10.12. Примеры исходных фотографий и поле скоростей, полученное методом PIV (экспозиции 12 мкс и 6 мкс)

Погрешность метода определялась, как и в предыдущем случае, уменьшением экспозиции. Для определения скорости потока и верификации данных PIV использовался ультразвуковой профилометр скорости. Была проведена серия экспериментов с использованием различных типов датчиков: 0,5 МГц, 2 МГц, 4 МГц, 8 МГц. В итоге было обнаружено, что стенка из оргстекла вносит существенные погрешности в определяемую скорость потока, т.к. при нулевой скорости потока профилометр давал значение в несколько метров.

Для устранения погрешности в секции под углом в 4° датчик был расположен в зоне контакта с потоком. Угол рассчитывался таким образом, чтобы цилиндр не попадал в активную зону датчика. В качестве основного был выбран 4 МГц – датчик, т.к. он обладает разрешающей способностью 0,33 мм (минимально возможной) и имеет достаточную мощность, для того чтобы проникать в разгазированный поток воды, что невозможно для датчика на 8 МГц. Перед использованием датчика для определения скорости потока каждый раз проводилось тестовое измерение на глубину проникновения ультразвука. Для этого к UVP подключался осциллограф (Tektronix TDS 3014B), и по отраженному эхо-сигналу определялось положение противоположной стенки. При увеличении давления в ресивере увеличивалось количество пузырьков, образующихся из-за разгазирования воды в измерительной секции. В результате при определенном газосодержании ультразвук переставал доходить до задней стенки. Для решения этой проблемы выходное отверстие из измерительной секции уменьшалось – перепад давления становился меньше и объемное газосодержание уменьшалось, что позволило применить ультразвуковой профилометр при больших скоростях потока и получить больше экспериментальных точек.

4) В эксперименте давление изменялось от высокого давления в ресивере до низкого давления в сверхзвуковом потоке ГЖС, а при помещении цилиндра в поток последний тормозился и давление восстанавливалось (увеличивалось), но не до значения в ресивере, а ниже. Диаметр пузырьков при этом уменьшался. Этот эффект изменения структуры потока при взаимодействии потока с телом в потоке называется в иностранной литературе Fluid-structure interaction. Возможность

существования волн полной дисперсии в дисперсных средах была впервые указана G. Rudniger. Волна полной дисперсии возникает потому, что число Маха для несущей среды много больше эффективного числа Маха для дисперсной среды в целом; поэтому, когда ударная волна существует в «эффективном газе», разрыв параметров несущей среды может отсутствовать. Более полный обзор работ по результатам исследования волн полной дисперсии приведен в диссертации Голубкиной И.В. «Взаимодействие ударных волн в запыленном газе». Для *измельчения пузырьков* в установке инициировалась волна полной дисперсии, но сам факт измельчения пузырьков не был экспериментально зафиксирован в связи с непрозрачностью среды. Для выяснения этого был использован термоанемометр фирмы Dantec, осциллограф National Instruments и программное обеспечение LabView. При соприкосновении пузырька с зондом термоанемометра из-за более низкой теплопроводности газа происходит резкий скачок напряжения вниз. Чем меньше пузырек, тем меньше амплитуда скачка и его длительность. Для анализа полученных осциллограмм была написана программа на LabView, которая считала количество пиков, их среднюю ширину и амплитуду на выделенном участке.

Для доказательства достоверности полученных экспериментальных данных далее приводится анализ применимости используемых методик для измерений в пузырьковых средах.

Термоанемометрия используется для определения локального газосодержания, площади межфазной поверхности, скорости проскальзывания, размера пузырьков, скорости фаз. На основе приведенных в литературе данных и тестовых экспериментов была проверена применимость термоанемометрии для больших газосодержаний и скоростей потока и установлены качественные и количественные закономерности, совпадающие с предыдущими работами (рис. 10.13.).

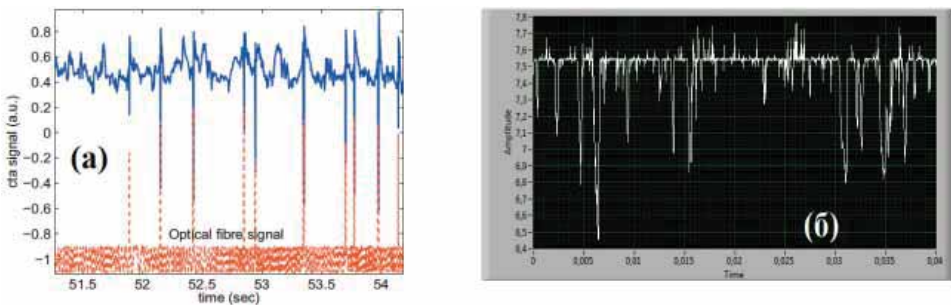


Рис. 10.13. Обоснование применимости термоанемометрии для больших газосодержаний и скоростей потока а) данные из работы [10.31]; б) пример осциллограммы, полученной И.М.Даниловым [10.30].

Выделяют 4 стадии взаимодействия пузырька с зондом: 1) пузырь сдавливает жидкость перед зондом, в результате скорость воды возрастает и повышается напряжение моста; 2) зонд частично проникает в пузырь и касается межфазной границы, в результате теплообмен снижается и напряжение моста падает; 3) зонд проникает внутрь пузырька, смачиваясь, в результате напряжение резким скачком возрастает; 4) зонд покидает пузырь, и напряжение падает. Были проведены сравнения изменения сигнала при соприкосновении с пузырьком в зависимости

от формы пузырька и угла соприкосновения. Van den Berg установил, что U-образное падение напряжения моста наблюдается во всех случаях. На рис. 10.13а приведены характерные осциллограммы напряжения моста термоанемометра и данные оптического пробника, подтверждающие контакт с пузырьком. На осциллограмме, полученной в лаборатории (рис. 10.13б), видны характерные U-образные сигналы, свидетельствующие о соприкосновении зонда с пузырьком. На этой осциллограмме отсутствуют пики, характерные для первой стадии – сжатия жидкости пузырьком, что свидетельствует о нулевой скорости проскальзывания. Снижение скорости проскальзывания в случае большой концентрации пузырей подтверждено электродиффузионным методом в работе Кашинского, также в этой работе установлено, что скорость проскальзывания падает с увеличением скорости жидкости и объемного газосодержания, и приведена эмпирическая формула для определения этой скорости в зависимости от газосодержания. Скорость проскальзывания, определенная по этому выражению для всех экспериментов, в данной работе имела отрицательное значение, это объясняется тем, что зависимость получена для газосодержания до 15 %. В работе F. Magauda было установлено, что скорость проскальзывания уменьшается при увеличении скорости газа. Численный расчет всплытия плотной упаковки пузырей в неподвижной воде показал, что уменьшение среднего диаметра пузырька приводит к уменьшению скорости всплытия всей упаковки. Из вышесказанного и из того, что во всех экспериментах плотность пузырьков была близкой к критической, следует, что в том диапазоне скоростей и газосодержаний, при которых проводились эксперименты, пузырьки заморожены в поток. В данной работе PIV использовалось для верификации данных термоанемометрии и для определения снижения скорости потока жидкости за счет его разгазирования. Для адаптации метода PIV к условиям поставленных экспериментов была использована методология, разработанная в начале 2000-х годов применительно к более низким газосодержаниям для построения поля скоростей пузырьковой жидкости. В этих работах и последующих были предложены различные техники определения скорости фаз с различной степенью точности (по размеру; теневой метод + флуоресцентные частицы; флуоресцентные частицы + световые фильтры; метод, основанный на сильной отражающей способности межфазной поверхности). Но при этом для обработки трассирующих частиц и пузырьков использовался один метод, т.к. было установлено, что сигналы, полученные от трассирующей частицы и от межфазной поверхности, одного типа. Данные о скоростях фаз, полученные PIV, верифицировались другими методиками, в частности: *conductive probe*, *optical probe*, LDA, томографией, электродиффузионным методом и термоанемометрией. Параметры обработки фотографий в данной работе были выбраны в соответствии с рекомендациями, приведенными в работах по измерению двухфазных потоков методом PIV. Методика PIV на данный момент адаптирована к измерениям в пузырьковых средах в достаточной мере, для того чтобы определить скорость каждой фазы и объемное газосодержание; определить мелкомасштабные возмущения, вызванные всплытием одиночного пузыря, и изменение формы пузырька при всплытии.

В качестве сравнения результатов обработки фотографий на рис. 10.14а приведены результаты обработки из работы [10.32] при высокой плотности пузырьков (до 30 % газосодержания) и результаты, полученные в данной работе (рис. 10.14б–с).

В частности, в упомянутой работе проводилось сравнение различных алгоритмов для обработки изображений и было установлено, что наилучшие результаты дает алгоритм cross-correlation. При выборе алгоритма учитывались следующие особенности пузырьковых сред: перекрытие пузырьков; различный диаметр пузырьков; различия в скорости движения пузырьков; осцилляции пузырьков, вызванные развитой турбулентностью; специфическое рассеивание света на пузырьках, обусловленное отражением и преломлением света на межфазной границе.

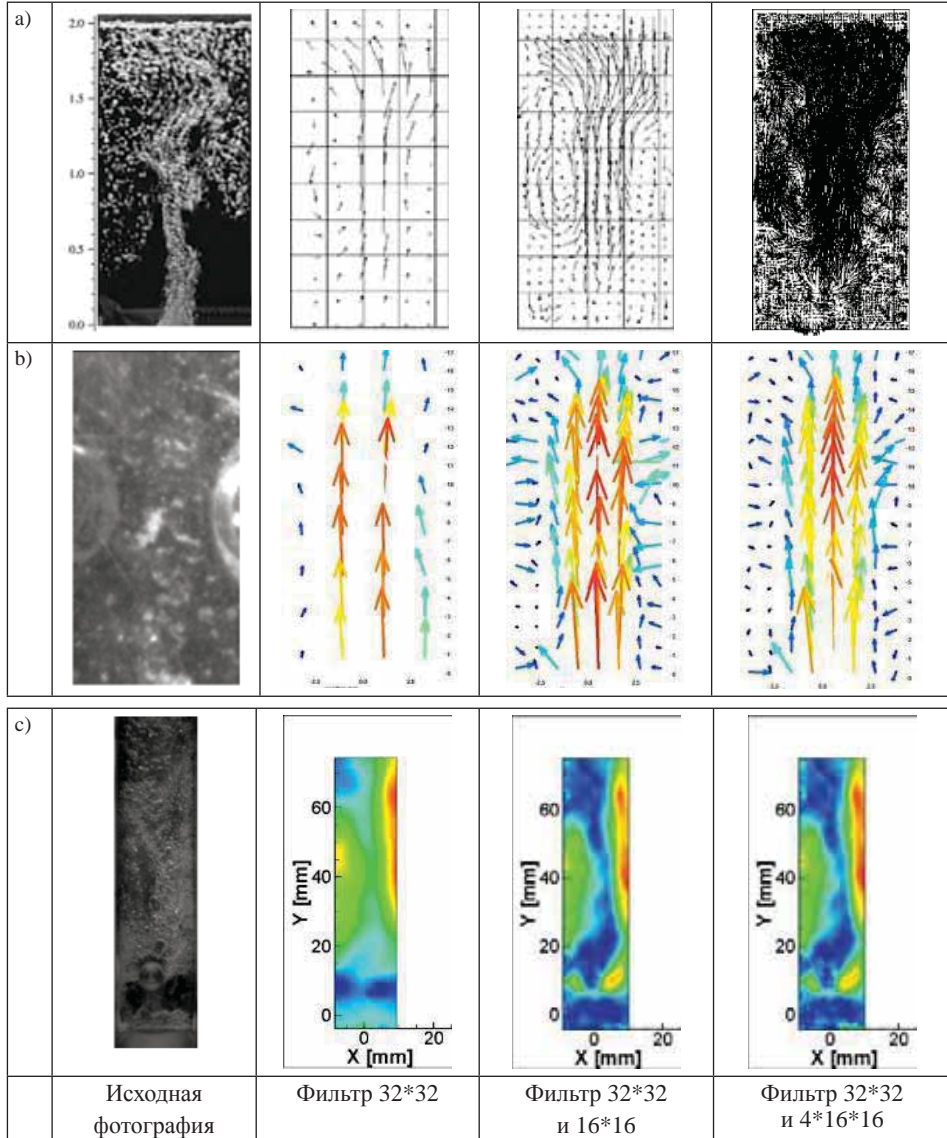


Рис. 10.14. Обоснование применимости методики PIV для измерений в пузырьковых средах для определения скоростей фаз и объемного газосодержания: а) примеры обработки фотографий из работы [32], б-с) полученные в [30] при тех же параметрах обработки.

Некоторые значения для ширины волны дисперсии в пузырьковой смеси с газосодержанием 70 % по объему приведены в табл. 10.2. Последние два значения приводятся для оценки погрешности измерения скорости. Точность показаний термоанемометра (width) выше, чем точность определения скорости (Mixture rate), и составляет 1,5 %, поэтому для определения погрешности полученных значений скорости использовались данные о ширине волны полной дисперсии. Погрешность определения скорости составила не более 10 %.

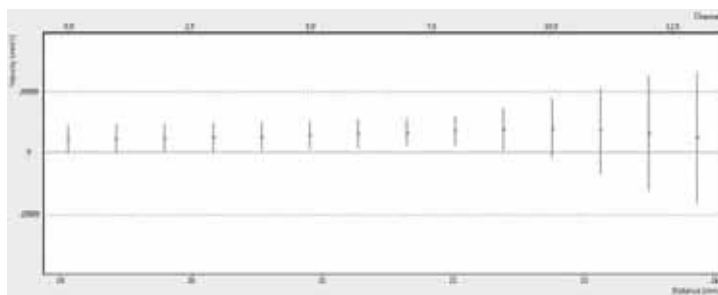


Рис. 10.15 Метод определения скорости профилометром ультразвукова. Пример распределения скорости вдоль линии распространения ультразвука.

Таблица 10.2. Ширина волны полной дисперсии при разных скоростях потока

Скорость потока [m/s]	ширина [mm]
29.9	3.395
28.7	3.24
26.8	2.82
26.7	3.1

Скорости, определенные методом PIV и UVP, отличаются на 15–30 %, но совпадают качественно (рис. 10.16). Такое большое отличие вызвано использованием UVP при скоростях, на порядок превышающих рекомендованный интервал в инструкции.

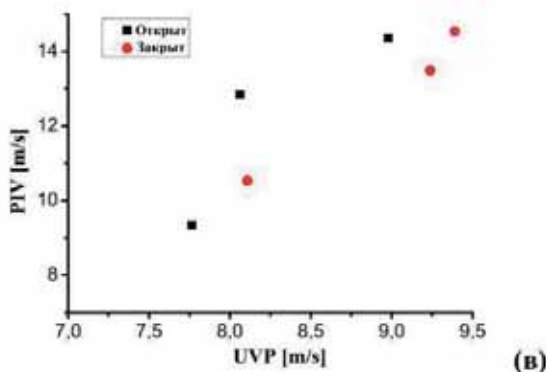


Рис. 10.16. Измерения скорости разгазированного потока методом PIV и ультразвуком. «Закрыт» – в верхней секции избыточное давление, «Открыт» – избыточного давления нет

5) Для определения *степени возмущения потока* зондом была проведена скоростная съемка (рис. 10.17). Зонд расположен слева от цилиндра. Цилиндр расположен перпендикулярно к плоскости фотографии.

Из рисунка видно, что зонд оказывает влияние на структуру потока при низком газосодержании, при газосодержании выше 50 % зонд перестает вносить сколько-нибудь заметные изменения в поток. По этой причине далее рассматривается смесь с объемным газосодержанием 50 %.

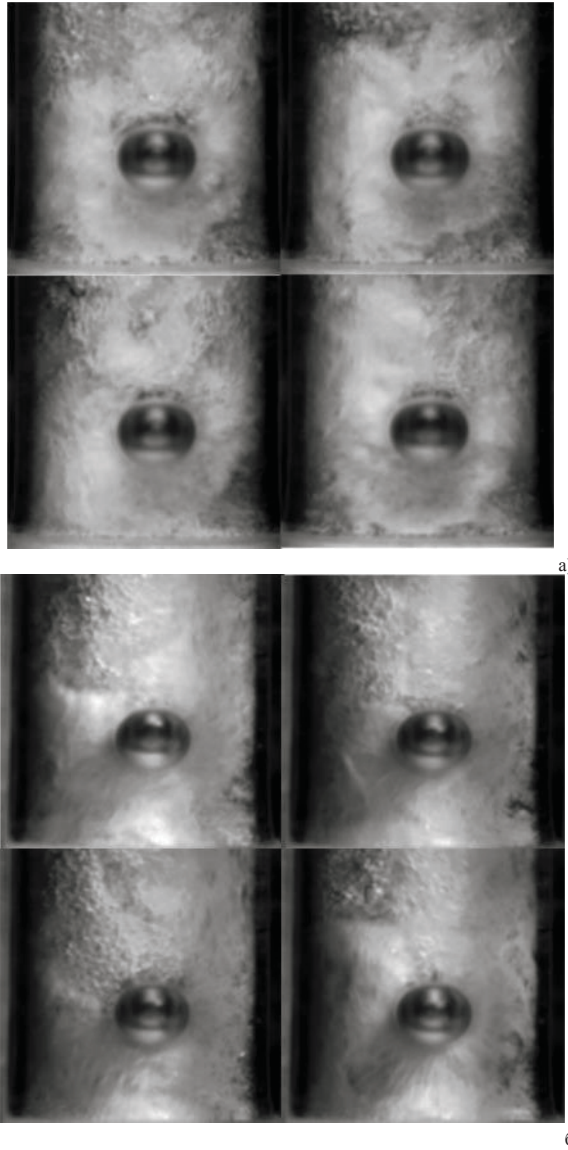


Рис. 10.17. а) газосодержание 26 % по объему, б) 40 %. Положение зонда при обходе по часовой стрелке, начиная с левой верхней фотографии: в нижнем положении, на уровне нижней границы, посередине цилиндра, над цилиндром

Результаты измерений

1) *Профиль скорости.* На рис. 10.18 приведены качественные профили скорости при обтекании цилиндра потоком воды и потоком ГЖС с различным газосодержанием, но при одном расходе воды, который указан в скобках. На следующем графике (рис. 10.19.) приведены профили скорости при одинаковых газосодержаниях, но при разных расходах смеси, указанных в скобках.

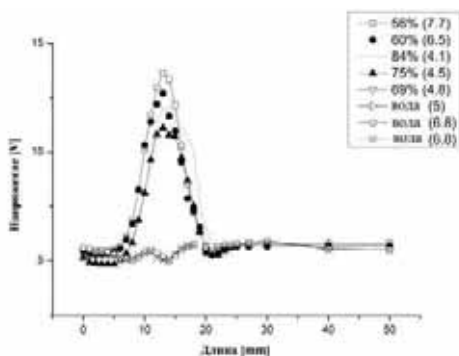


Рис. 10.18. Распределение напряжения, качественно соответствующее распределению скорости при обтекании цилиндра потоком воды и ГЖС

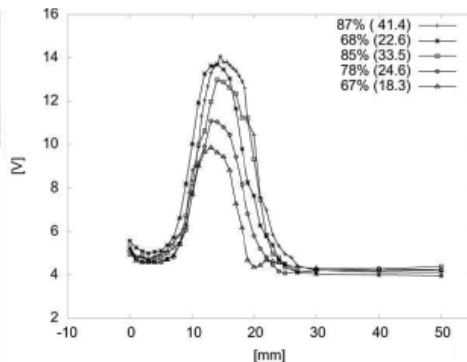


Рис. 10.19. Распределение напряжения при обтекании цилиндра ГЖС

Как показал анализ эксперимента, термоанемометр обладает хорошей чувствительностью на малые изменения объемного газосодержания смеси: если в ходе эксперимента объемное газосодержание, определяемое по расходам газа и жидкости, изменяется более чем на 2 %, то на графике зависимости напряжения от положения зонда появляется излом. В качестве примера на рис. 10.19 приведены графики 85 % и 67 %, полученные до установления стационарного режима. На первом – излом в точке [20 mm; 11 V], на втором – в точке [22 mm; 4.5 V], в обоих случаях излом свидетельствует об увеличении газосодержания на 5 %. Высокая чувствительность термоанемометра к газосодержанию позволила обнаружить, что выход на стационарный режим занимает 1,5–2 часа. Все полученные в работе данные измерены при стационарном режиме течения. Для получения сверхзвуковой скорости потока ГЖС использовалась высокая сжимаемость этих сред. Созданная при высоком давлении ГЖС подавалась в камеру с атмосферным давлением через ресивер со скоростью, равной местной скорости звука $c^{-2} = \rho(\varphi / \rho_2 c_2^2 + (1 - \varphi) / \rho_1 c_1^2)$. Характерный перепад давления в ходе эксперимента – 8–12 атм. В результате перепада давления объемная доля газа возрастала в несколько раз, при этом местная скорость звука падала в 1,5–2 раза. На рис. 10.20а приведены эффективные скорости звука до и после перепада давления без учета газа, растворенного в воде по закону Генри, учет которого увеличит скорость звука при высоком давлении. Приведенное выражение для эффективной скорости звука справедливо для всего интервала газосодержаний, при которых проводился эксперимент.

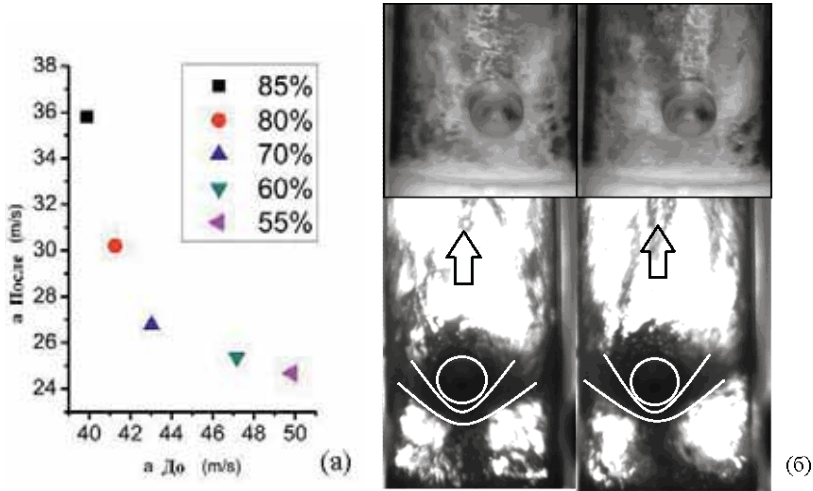


Рис. 10.20. а) скорость звука ГЖС до и после ресивера; б) теньевая фотография

Для обнаружения волны полной дисперсии (ВПД) была разработана следующая схема: теньевым методом был зафиксирован скачок уплотнения (рис. 10.17б); термоанемометром определен профиль скорости в этой области; максимальное напряжение соответствует переднему фронту ВПД, полувысота – заднему фронту; строится тарировочная зависимость ($E^2[V^2] = -39.3 + 1.38\sqrt{\rho[kg/m^3]}U[m/s^2]$), и по этой зависимости определяется скорость в двух обозначенных точках; далее определяются приведенные скорости за волной полной дисперсии и перед ней и перемножаются. Для всех поставленных экспериментов по определению ширины волны полной дисперсии произведение приведенных скоростей лежало в интервале $[0,6-1,1]$. Для построения тарировочной кривой для каждого газосодержания было получено не менее 6 точек, для верификации данных тарировочные кривые были построены для 2 типов датчиков – конусного и стандартного. Результаты измерений представлены в таблице 10.3. Как показал сравнительный анализ осциллограмм и произведений приведенных скоростей, дробление пузырьков наблюдается при $\lambda_1 \cdot \lambda_2 > 0,4$.

Таблица 10.3. Результат расчета приведенных скоростей при помощи тарировочных зависимостей

Газосодержание	U(калибров) [m/s]	U [m/s]	$\lambda_1 \cdot \lambda_2$
86	68	21	1,1
80	52	19	1,1
70	37	19	1,0
60	26	19,5	0,8
55	29	21	1,0

2) В результате измерения диаметра затопленной струи разгазированной воды перед цилиндром было установлено, что при увеличении перепада давления и, соответственно, увеличении газовой фазы в струе диаметр увеличивается от 3 до 4 мм (рис. 10.21). Измерение скорости потока двумя независимыми методами – PIV и ультразвуком – показало, что увеличение диаметра струи за счет разгазирования приводит к снижению скорости потока при одном и том же расходе жидкости (рис. 10.21). Каждая точка UVP получена усреднением 20 серий, каждая серия содержала 1024 профиля скорости. Промежуток между сериями составлял 40 мс. Снижение скорости по сравнению с неразгазированным потоком – 5–15 % (рис.10.21).

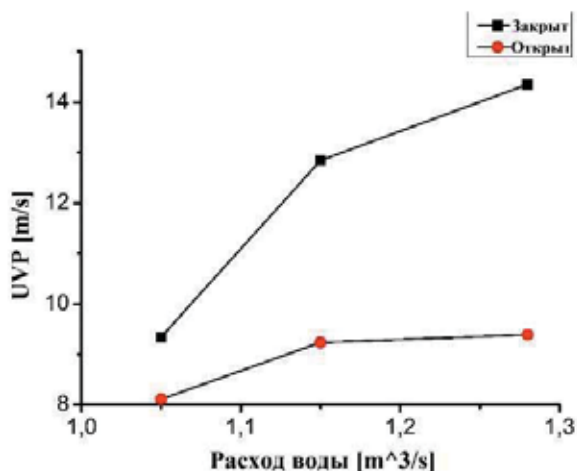


Рис. 10.21. Изменение скорости потока в зависимости от скачка давления после ресивера

«Открыт» – в измерительной секции нет избытка давления и газосодержание в струе выше, чем при «Закрыт» – в измерительной секции создано избыточное давление. Полученное значение позволяет оценить необходимую разницу между скоростями звука до и после ресивера.

3) Для определения относительного изменения радиуса пузырька при прохождении через ВПД на осциллограмме обрабатывался участок, соответствующий максимальной скорости – 10 %, т.е. в интервале [-2;2] мм, где 0 – соответствовал максимальному значению скорости. Это делалось для того, чтобы исключить влияние скорости потока на определение среднего размера пузырьков и их количества. Усреднение проводилось с шагом в 0,1 мм (рис. 10.22а). Усреднение по большим интервалам, вплоть до 1 мм, дало похожие результаты (рис. 10.22б).

В результате было установлено, что при прохождении через ВПД диаметр пузырька в среднем уменьшается в 3 раза. Интерполяционный полином для изменения размера пузырьков $f(x) = 0.072x^4 - 0.046x^3 + 0.05x^2 - 0.26x + 1.13$. Подсчет общего количества пиков дал следующие результаты (рис. 10.22а–

б) при тех же параметрах усреднения. Построенная аппроксимация говорит о том, что общее количество фиксируемых пузырьков уменьшилось на 8 %.

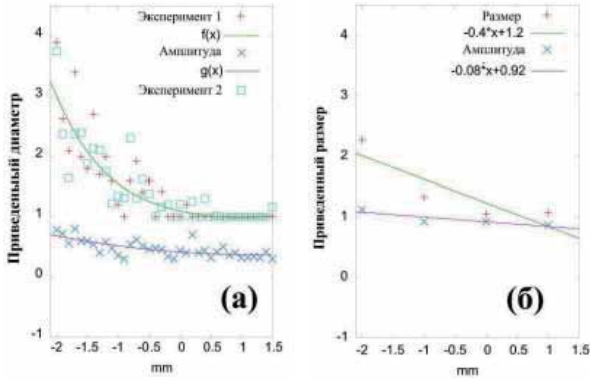
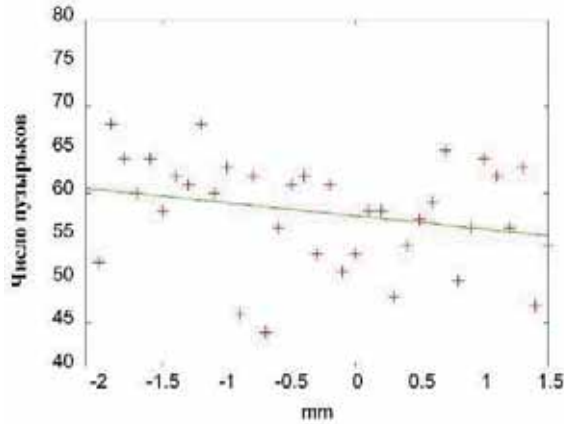
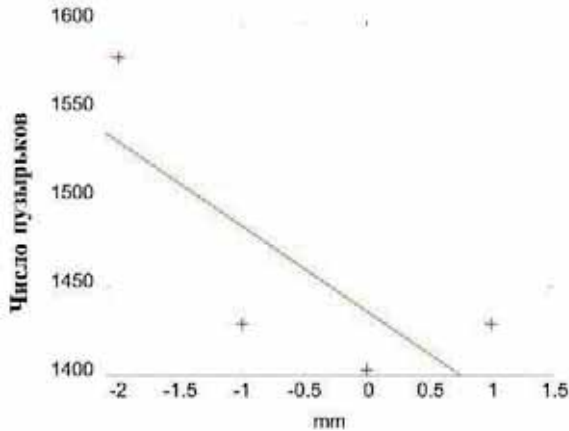


Рис. 10.22. а) Изменение диаметра пузырьков при прохождении через ВПД – замер сделан каждые 0,1 мм, диаметр приведен к 30мкм; б) через 1 мм



а)



б)

Рис. 10.23. а) изменение числа пузырьков, шаг 0,1 мм; б) шаг 1 мм

Зонд термоанемометра может зафиксировать пузырь с минимальным диаметром $d \sim 30 \text{ мкм} = V \cdot t_{sr}$, где V – скорость потока, t_{sr} – время между соседними точками (sample) на осциллограмме. Определенный таким образом средний размер пузыря в ВПД ~ 30 мкм (рис. 10.23а). Усреднение по большим временным интервалам дало похожие результаты. Рассчитанное выше значение числа Вебера до волны полной дисперсии позволяет сделать вывод о том, что пузырьки дробятся по следующему механизму: один пузырь распадается на два или четыре, а время дробления и время прохождения через волну говорят о том, что дробление успевает произойти только один раз. 96 % пузырьков до ВПД имело размер 90 мкм (рис. 10.23а). Учитывая трехкратное уменьшение среднего размера, можно оценить средний размер пузырьков в ВПД – 30 мкм, что совпадает с полученным усреднением диаметра пузырька после точки 0 на рис. 10.23а и с нормальным распределением пузырьков в ВПД (рис. 10.23б). Уменьшение числа пиков на 8 % говорит о том, что в ряде случаев пузырек дробится на 4 части.

Выводы

В результате экспериментальных работ установлено следующее:

1) Методы термоанемометрии PIV применимы в двухфазном потоке с большим газосодержанием при скоростях выше местной скорости звука и позволяют определить профили скорости. Погрешность измерения ширины волны полной дисперсии не более 1,5 %. Погрешность определения скорости в калибровочной точке 10 %.

2) Ширина волны полной дисперсии увеличивается с увеличением газосодержания и скорости потока. Произведение приведенных скоростей до и после волны полной дисперсии ~ 1 , что подтверждает адекватность метода получения тарировочной зависимости.

3) При прохождении через волну полного давления (ВПД) размер пузырьков снижается в 3 раза.

10.3. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В МАКЕТЕ МАСЛОНАПОЛНЕННОГО АВТОТРАНСФОРМАТОРА С ГЖДС

Динамическая защита представляет собой пузырьковые колонны элегаза (SF_6), поднимающиеся вдоль стенок автотрансформатора. Целью данного исследования является оценка влияния пузырьковой колонны на конвекцию и теплообмен для последующей оптимизации конструкции динамической защиты в реальном автотрансформаторе. Исследование проводится на САД модели двухмерного макета автотрансформатора.

Свойства элегаза.

Основные характеристики и свойства элегаза [24, 25]:

– Нетоксичный, негорючий химически инертный практически бесцветный газ без запаха;

– Электрическая прочность в 2–4 раза выше, чем у воздуха. Высокая электрическая прочность элегаза позволяет сократить изоляционные рас-

стояния при небольшом рабочем давлении газа, в результате этого уменьшается масса и габариты электротехнического оборудования;

– При нормальном давлении может находиться в любом из трёх агрегатных состояний при температуре до минус 50,8 °С;

– Плохо растворим в воде (1 объем SF₆ в 200 объемах воды) и этиловом спирте;

– Элегаз не стареет, т.е. не меняет своих свойств с течением времени, при электрическом разряде распадается, но быстро рекомбинирует, восстанавливая первоначальную диэлектрическую прочность;

– При температурах до 1000 °К элегаз инертен и нагревостоек, до температур порядка 500 °К химически не активен и не агрессивен по отношению к металлам, применяемым в конструкции элегазовых распределительных устройств;

– В электрическом поле элегаз обладает способностью захватывать электроны, что обуславливает высокую электрическую прочность элегаза. Захватывая электроны, элегаз образует малоподвижные ионы, которые медленно разгоняются в электрическом поле;

– Эксплуатационная способность элегаза улучшается в равномерном поле, поэтому для эксплуатационной надежности конструкция отдельных элементов распределительных устройств должна обеспечивать наибольшую равномерность и однородность электрического поля;

– Плотность при T = 273 К и давлении p = 0,1 МПа равна 6,56 кг/м³;

– Относительная диэлектрическая проницаемость = 1,0021;

– Диаметр молекулы = 5,33 Å;

– Теплопроводность = 0.7 теплопроводности воздуха;

– Удельная теплоемкость = 0.59 удельной теплоемкости воздуха;

– Критическая температура = 318,7 °К;

– Критическое давление = 3,71 МПа;

– Молярная масса M = 14.606 кг/кмоль;

– Теплоемкость при постоянном давлении Дж кг⁻¹ К⁻¹

$C_p = 914.29 + 0.1204T - 25.831 \cdot 10^{-6}T^2$;



Рис. 10.24. Структура молекулы и свойства элегаза SF₆

– В неоднородном поле появляются местные перенапряженности электрического поля, которые вызывают коронирующие разряды. Под действием этих разрядов элегаз разлагается, образуя в своей среде низшие фториды (SF₂, SF₄), вредно действующие на конструкционные материалы комплектных распределительных элегазовых устройств;

– Во избежание разрядов все поверхности отдельных элементов металлических деталей должны быть чистыми и гладкими и не иметь шероховатостей и заусенцев. Обязательность выполнения этих требований диктуется тем, что грязь, пыль, металлические частицы также создают местные на-

пряженности электрического поля, что ухудшает электрическая прочность элегазовой изоляции.

В обсуждаемых ниже расчетах плотность элегаза вычисляется по закону идеального газа.

На рис. 10.25 показана геометрическая модель автотрансформатора, на которой проводилось исследование влияние динамической защиты на конвекцию масла и теплообмен.

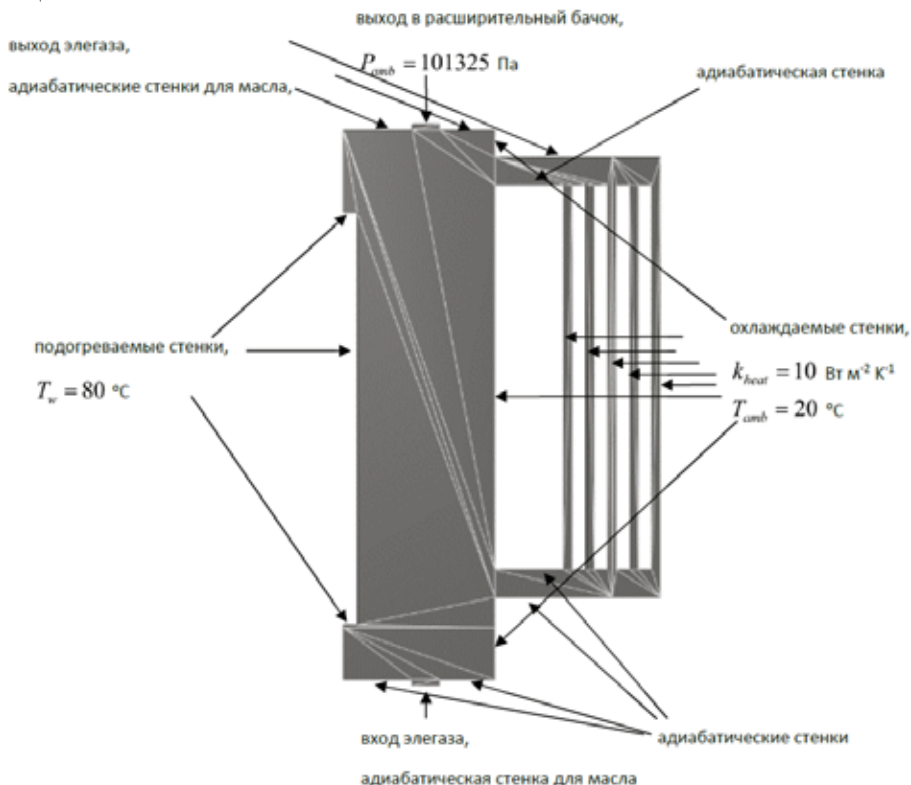


Рис. 10.25. Расчетная область и граничные условия

Условия. Давление окружающей среды:	$P_{amb} = 101325$	Па
Температура окружающей среды:	$T_{amb} = 20$	°C
Коэффициент теплоотдачи:	$k_{heat} = 10$	Вт м ² К ⁻¹
Температура подогреваемых стенок:	$T_w = 80$	°C
Удельный объемный расход элегаза:	$G_{SF6, vol} / S = 1.667$	м с ⁻¹

Указанное значение удельного объемного расхода соответствует 1 литру в минуту на погонный метр системы подачи элегаза. Постановка граничных условий показана на рис. 10.25.

Были рассмотрены следующие значения среднего диаметра пузырей:

d [м]	0.0001	0.001	0.01
---------	--------	-------	------

Результаты расчетов

На рис. 10.26–10.27 показаны стационарные распределения скорости и температуры масла в макете автотрансформатора без демпферной защиты.

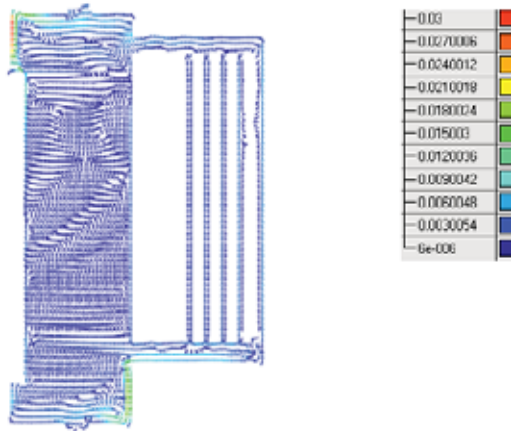


Рис. 10.26. Скорость масла без демпферной защиты

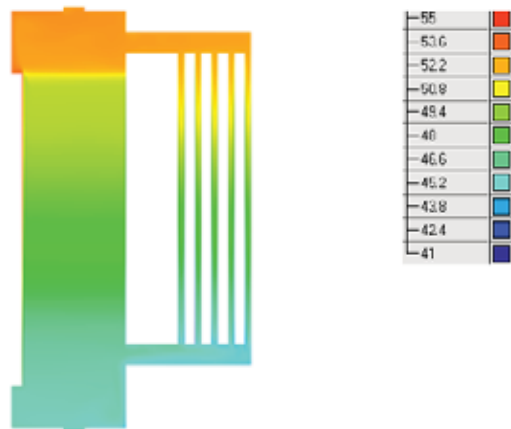


Рис. 10.27. Температура масла без демпферной защиты:
пузырьки элегаза и диаметром 0,0001 м

На рис. 10.28 показаны стационарные распределения скорости пузырей и масла в макете автотрансформатора с пузырьковой защитой (представляющей собой колонну из пузырьков элегаза диаметром 0.1 мм). На рис. 10.29 показаны стационарные распределения температуры пузырей и масла.

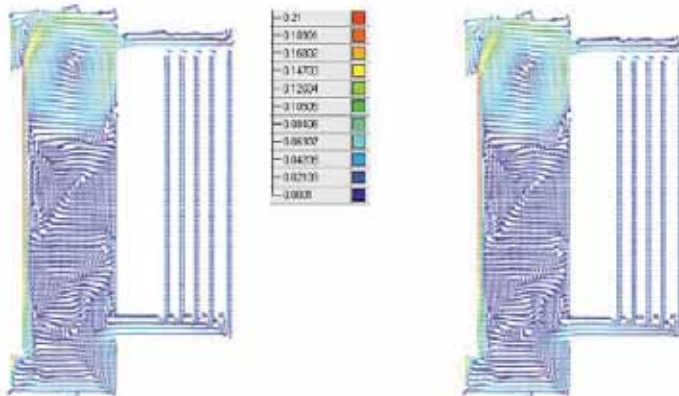


Рис. 10.28. Скорость пузырьков элегаза (слева) и скорость масла (справа)

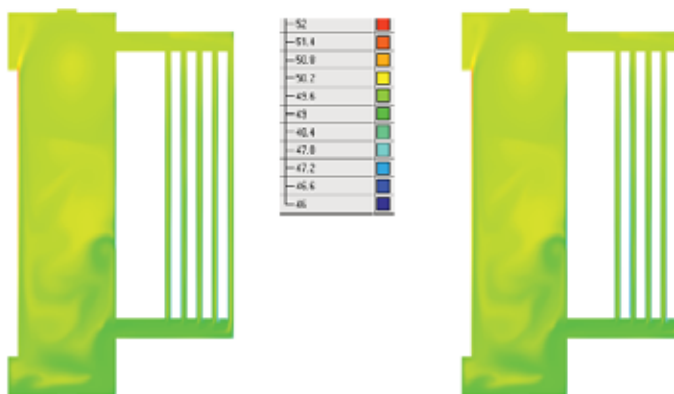


Рис. 10.29. Температура пузырьков элегаза (слева) и температура масла (справа)

На рис. 10.30 (в двух цветовых масштабах) показано стационарное распределение относительного объема пузырьков элегаза.

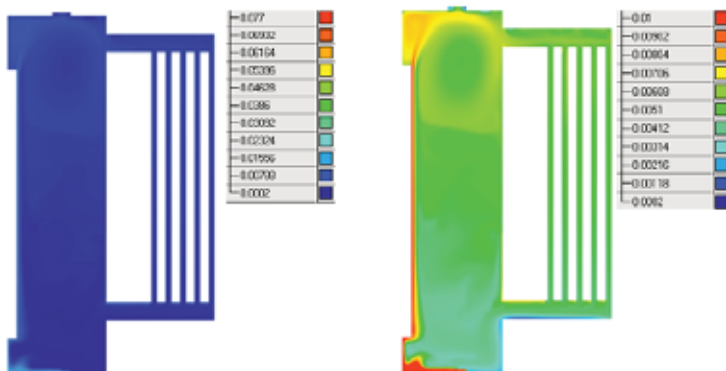


Рис. 10.30. Относительный объем дисперсной фазы

Из представленных в этом разделе рисунков видно, что «маленькие» пузырьки:

а) присутствуют во всем объеме трансформатора (легко увлекаются маслом);

б) усиливают конвекцию (делают циркуляцию масла в объеме трансформатора более интенсивной);

в) делают распределение температуры в объеме трансформатора более равномерным (за счет интенсификации конвекции).

Пузырьки диаметром 0,001 м.

На рис. 10.31 показаны стационарные распределения скорости пузырьков элегаза и масла в макете автотрансформатора с пузырьковой защитой (представляющей собой колонну из пузырьков элегаза диаметром 1 мм). На рис. 10.32 показаны стационарные распределения температуры пузырьков и масла.

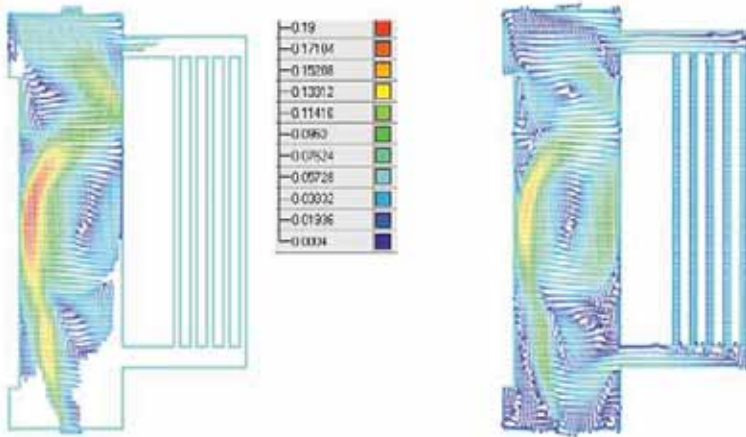


Рис. 10.31. Скорость пузырьков элегаза (слева) и скорость масла (справа)

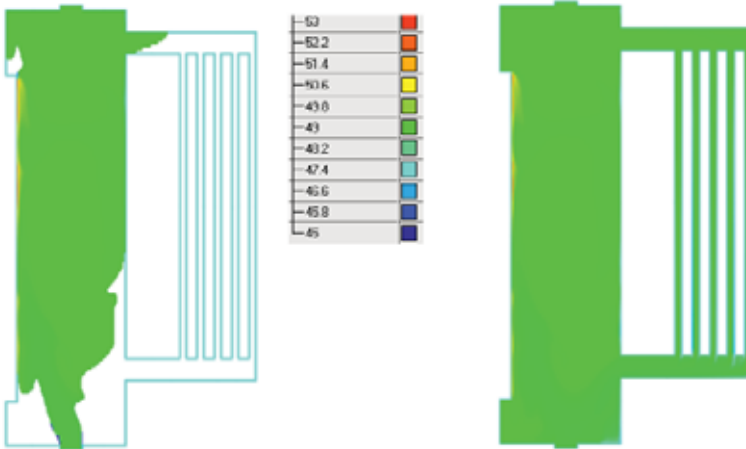


Рис. 10.32. Температура пузырьков элегаза (слева) и температура масла (справа)

На рис. 10.33 (в двух цветовых масштабах) показано стационарное распределение относительного объема пузырей.

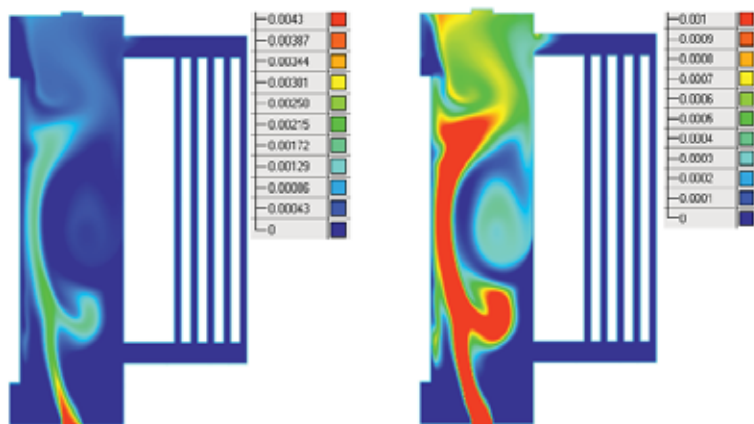


Рис. 10.33. Относительный объем дисперсной фазы

Из представленных в этом разделе рисунков видно, что «средние» пузыри:
а) имеют тенденцию подъема вверх;
б) не проникают в теплообменник;
в) усиливают конвекцию (делают циркуляцию масла в объеме трансформатора более интенсивной);

г) генерируют вихревые структуры вдоль своей траектории;
д) перемешивают нагретое и охлажденное масло.

Пузырьки диаметром 0,01 м.

На рис. 10.34 (в разных цветовых масштабах) показаны стационарные распределения скорости пузырьков и масла в макете автотрансформатора с демпферной защитой (представляющей собой колонну из пузырьков элегаза диаметром 1 см). На рис. 10.35 показаны стационарные распределения температуры пузырьков и масла.

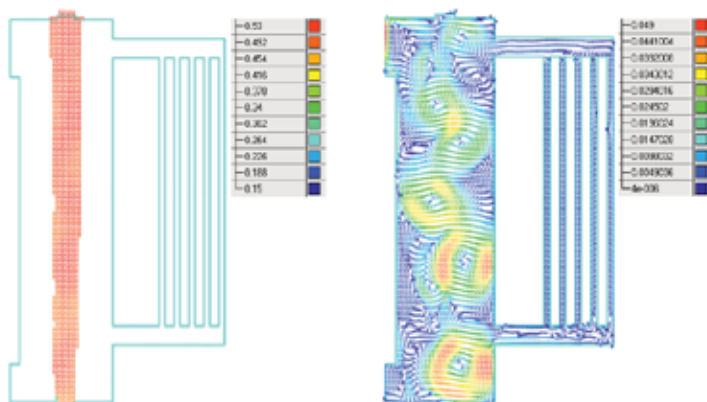


Рис. 10.34. Скорость пузырьков элегаза (слева) и скорость масла (справа)

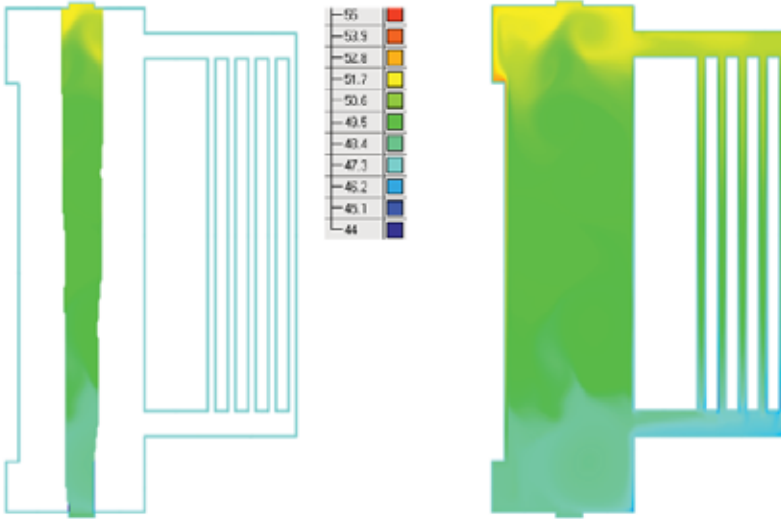


Рис. 10.35. Температура пузырьков (слева) и температура масла (справа)

На рис. 10.36 (в двух цветовых масштабах) показано стационарное распределение относительного объема пузырей.

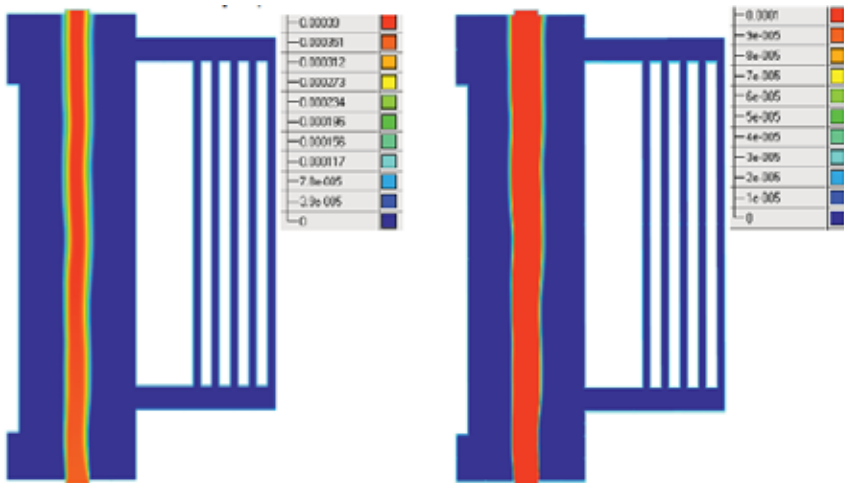


Рис. 10.36. Относительный объем дисперсной фазы

Из представленных в этом разделе рисунков видно, что «крупные» пузырьки:

- а) быстро поднимаются вверх;
- б) не проникают в теплообменник;
- в) не контактируют со стенками;
- г) генерируют вихревые структуры вдоль своей траектории;

- д) разрушают естественную конвекцию;
- е) перемешивают нагретое и охлажденное масло.

10.4. Испытания на взрывобезопасность макетного образца трансформатора с динамической газожидкостной системой защиты

При коротком замыкании в активной части маслаполненного трансформатора возникает электрическая дуга. Высокая температура дуги разлагает трансформаторное масло с образованием большого количества газов. В основном это ацетилен и водород, которые при высокой температуре и контакте с воздухом самовоспламеняются, что приводит к пожарам и тяжёлым авариям. Процесс развивается в течение нескольких миллисекунд, при этом давление в баке резко возрастает, превышая критические величины. Устранение последствий таких аварий требует значительных капиталовложений для восстановления оборудования. Поэтому высоковольтные силовые маслаполненные трансформаторы снабжают средствами защиты от взрыва.

Помимо масляных трансформаторов, известны трансформаторы, охлаждаемые элегазом. Промышленное использование элегаза основано на низкой химической активности и специфических физических свойствах газа: электрическая и диэлектрическая прочность, высокая теплоемкость, низкая теплопроводность, низкая вязкость и др. В отличие от масляных высоковольтных трансформаторов, возникновение взрыва в элегазовых трансформаторах не приводит к их полному разрушению, а выброс в атмосферу элегаза, в отличие от масла, не приводит к возникновению пожара – в этом их основное преимущество по сравнению с масляными трансформаторами. Однако, масляные трансформаторы стоят дешевле, причем эта разница в цене с повышением напряжения становится существенной. Недостатком элегазовых трансформаторов также является меньшее значение тепловой постоянной времени по сравнению с маслаполненными трансформаторами, следствием этого является меньшая допустимая длительность перегрузок элегазовых трансформаторов. По этой причине элегаз мало используется при создании силовых трансформаторов. Элегаз, в отличие от других газов, имеет достаточно высокое напряжение пробоя. С другой стороны, сжимаемость элегаза (как и любого другого газа) привлекает внимание при решении вопроса создания взрывобезопасного и взрывозащищенного трансформатора.

10.4.1. Экспериментальный стенд ГЖС

В рамках проекта по созданию взрывобезопасного маслаполненного высоковольтного электрооборудования в ОИВТ РАН был создан макетный образец, который представляет собой гибридный трансформатор, в котором используется разработанная авторами данной монографии система, состоящая из трансформаторного масла и небольшого количества создаваемых и поддерживаемых пузырьков элегаза в пристеночной области корпуса трансформатора. Стенд для моделирования процессов, происходящих в масля-

ных трансформаторах и высоковольтном маслонаполненном электрооборудовании при коротком замыкании в сети, вызванным пробоем изоляции высоковольтного элемента внутри трансформатора на «землю», показана на рис. 10.37 (структурная схема) и на рис. 10.38 – внешний вид.

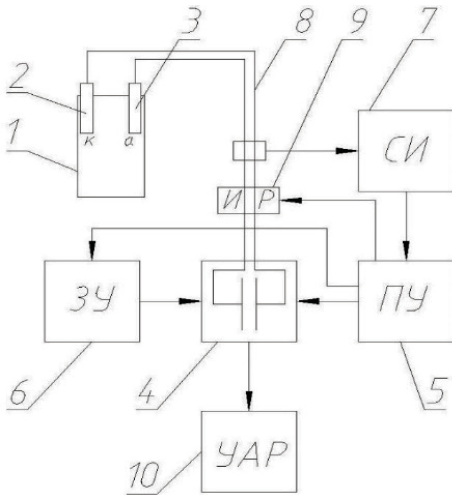


Рис. 10.37. Структурная схема стенда



Рис. 10.38. Трансформатор ТМ 1000–6,0

Стенд состоит из корпуса масляного трансформатора 1, катодного 2 и анодного 3 электродов, конденсаторной батареи 4, пульта управления 5, зарядного устройства 6, системы измерительной 7, шинопроводов 8, игнитронного разрядника 9 и устройства аварийного разряда 10. Трансформатор ТМ 1000–6,0 представлен на рис. 10.38. Доработка трансформатора для эксперимента производилась следующим образом. Снята крышка трансформатора, вынут сердечник с обмоткой и сняты радиаторы. Корпус накрыт герметичной крышкой с электродным узлом и газовыми подводами. В крышку вмонтированы проходные изоляторы 10 кВ, через которые проходят электроды в полость корпуса.

При испытаниях использовалось два варианта электродных узлов трансформатора: параллельный (рис. 10.39) и соосный (рис. 10.40). Катодный и анодный электроды представляют собой латунные прутки диаметром 50 мм. Электроды эквидистантно входят в полость корпуса через плиту 3 вертикально сверху вниз и далее изогнуты на 90° , то есть их рабочие участки расположены горизонтально. В плиту электроды встроены через высоковольтные электрические изоляторы 2.

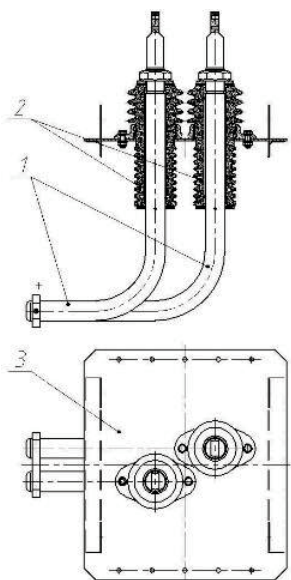


Рис. 10.39. Конструкция электродного узла с параллельным расположением электродов

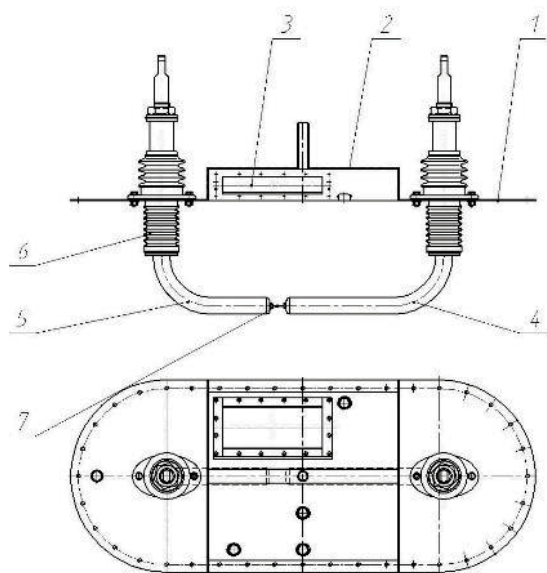


Рис. 10.40. Конструкция электродного узла с соосным расположением электродов

Конструкция электродного узла с соосным расположением электродов показана на рис. 10.40. В крышке трансформатора 1 с центральной призматической частью 2 и смотровым окном 3 закреплены латунные электроды 4 в проходных изоляторах 6. Между торцами электродов установлена проволока 7 для инициирования дугового разряда. Электрооборудование стенда включает в себя низковольтную и высоковольтную части, оно описано в главе 10, диагностика электрических параметров описана там же.

10.4.2. Система аэрации трансформаторного масла элегазом

Принципиальная гидро-пневматическая схема трансформатора показана на рис. 10.41.

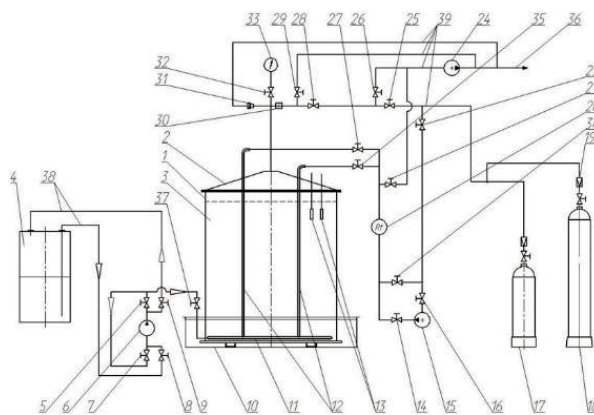


Рис. 10.41. Принципиальная гидро-пневматическая схема трансформатора

Корпус трансформатора 1 заполнен маслом 3. К корпусу 3 герметично пристыкована крышка 2 со встроенными в нее датчиками импульсного давления 13 и вводами 12 азэрата 11. Элегаз подается в систему из баллона 17. Перед подачей элегаза в масло подается азот из баллона 18 для продувки от атмосферного воздуха. Также, азот необходим как дешевый аналог элегаза для отработки конструкции азэрата и режимов его работы. На баллонах установлены газовые редукторы 19. Перед подачей элегаза в систему азэрации возможна откачка атмосферного воздуха из трубопроводов и резино-тканевых рукавов 39 с помощью вакуумного насоса 24. Для предотвращения повышения давления в трансформаторе выше 0,05 МПа – максимально допустимое давление по паспорту – в систему встроены предохранительный клапан 31, который открывается при достижении указанного давления и отводит избыток газа в атмосферу через вывод 36. Суммарный расход газа, циркулирующего через трансформаторное масло, определяется с помощью ротаметра 20. Расход по двум ветвям 12, подводящим элегаз к двум половинам азэрата регулируется с помощью вентиля 27 и 35. Сетчатый маслоотбойник 30 необходим для предотвращения попадания вместе с потоком элегаза капель масла в компрессор 15, который обеспечивает циркуляцию элегаза в корпусе. К трансформатору также подключен мановакуумметр 33, показывающий относительное давление в корпусе.

Масло 3 закачивается из емкости 3 в корпус трансформатора 1 с помощью масляного насоса 6 по маслястойким рукавам 38. Система вентиля 5, 7, 8, 9, 37 позволяет как заполнять маслом корпус, так и перегонять его обратно в бочку. Во избежание разлива масла при разгерметизации корпуса, которая возможна при испытаниях на большой энергии дугового разряда, трансформатор установлен на масляный поддон 10.

Конструкция азэрата.

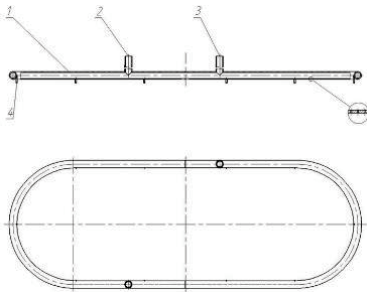


Рис. 10.42. Конструкция азэрата
(Вариант 1)

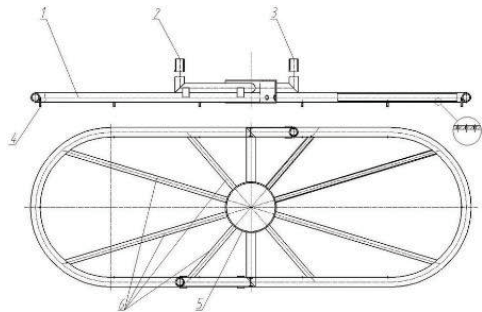


Рис. 10.43. Конструкция азэрата
(Вариант 2)

Азэрат представляет собой кольцевую трубу 1 с подводами 2 и 3, в которой выполнены отверстия с нижней стороны диаметром 0,5 мм. Ножки 4, приваренные по периметру трубы для приподнятия азэрата над уровнем дна. Отверстия расположены снизу трубы для вытеснения из трансформаторного масла элегазом в начале процесса продувки.

Первоначальный вариант аэратора обнаружил недостаток после проведения первой серии экспериментов. В дальних от подводов участках кольцевой трубки образовывались масляные пробки, которые препятствовали прохождению элегаза. Поток пузырьков в объеме масла был неравномерным, значительный объем масла не снабжался элегазом.

Для достижения равномерного распределения пузырьков элегаза в объеме масла разработана новая конструкция аэратора (рис. 10.43). Усовершенствованная конструкция аэратора отличается от первоначальной тем, что в центре у него расположен общий коллектор 5, от которого лучами расходятся подводы 6. Таким образом, достигается равномерное распределение элегаза по периметру аэратора, так как сглаживается неравномерность сопротивления прохождению элегаза через нижние отверстия в различных участках кольцевого трубопровода. Данный вариант конструкции аэратора позволяет значительно повысить содержание пузырьков элегаза в трансформаторном масле.

10.4.3. Программа и методики испытаний трансформатора с ГЖС защитой

Объектом исследований является высоковольтный трансформатор (макетный образец маслонаполненного автотрансформатора напряжением 220/110 кВ IV габарита с системой динамической защиты). В качестве макетного образца взят модернизированный трансформатор ТМ 1000–6,0, в котором обеспечивается подача в нижнюю часть корпуса элегаза в виде пузырьков и его откачка из верхней части корпуса. Двухфазная смесь из трансформаторного масла и непрерывно всплывающих пузырьков элегаза является эффективной демпфирующей средой при любых всплесках давления, вызванных, вследствие возникновения внутри трансформатора коротких замыканий электрического тока.

Целью проведения испытаний является определение эффективности разработанной динамической системы защиты от взрыва корпуса маслонаполненного автотрансформатора, а также выработка рекомендаций для разработки опытного образца автотрансформатора с динамической системой защиты от взрыва.

Методология проведения работы заключается в экспериментальном определении импульсного воздействия на стенку взрывной камеры ударной волны, образованной при выделении энергии в трансформаторном масле. Параметры, измеряемые при каждом эксперименте, сведены в таблице 10.4.

Таблица 10.4. Измеряемые параметры

Параметр	Ед. изм.	Диапазон измерений
Импульсное давление внутри корпуса в двух точках	МПа	0...100
Общее изменение давления в корпусе	кПа	0...50
Деформация корпуса в направлении, перпендикулярном большим граням	мм	0...20
Расход элегаза (в п. 2 таблицы 10.3).	мл/мин	0...1000
Ток разряда	кА	0...80
Напряжение на разрядном промежутке	В	0...300

Крышка трансформатора снабжена окном, через которое производится скоростная видеосъемка экспериментов.

Методика измерения напряжения

Для определения напряжения пробоя на разрядных электродах необходимо измерить потенциал каждого из электродов относительно земли, и вычесть полученные данные одно из другого. Для этих целей была собрана схема измерения напряжения на разрядных электродах, состоящая из дифференциального резистивно-емкостного делителя, одно плечо которого образовано резисторами R1, R2 и конденсаторами C1, C2, а второе плечо образовано резисторами R3, R4 и конденсаторами C3, C4. Каждое плечо делителя имеет коэффициент деления 1:100. Оба плеча заземлены в общей точке. Осциллограмма напряжения на разрядном промежутке (HV) получается путем вычитания осциллограммы, снятой в точке В, из осциллограммы, снятой в точке А. Следует также учитывать, что значения напряжения в соответствующих точках осциллограммы будут в 100 раз меньше, чем в реальности. Регистрация и вычитание осциллограмм производится с помощью цифрового осциллографа, имеющего возможность передачи информации на персональный компьютер.

Методика измерения тока разряда

Измерение тока разряда производится с помощью **пояса Роговского**, который представляет собой измерительный трансформатор тока выполненный в виде длинного замкнутого соленоида с произвольной и практически замкнутой формой и равномерной намоткой, один из выводов которой приведен к другому через ось соленоида. В нагруженном поясе Роговского электродвижущая сила пропорциональна изменению тока $I(t)$ в объекте измерения:

$$\varepsilon(t) = \frac{L}{N} \cdot \frac{dI(t)}{dt}$$

где L – индуктивность, N – количество витков. Для получения сигнала, пропорциональный току, необходимо проинтегрировать ЭДС в цепи пояса Роговского. Это достигается с помощью интегрирующей цепочки. В данной установке используется пояс Роговского модели MFC-150 (производства Италия). Отображение сигнала с пояса Роговского осуществляется с помощью цифрового запоминающего осциллографа имеющего возможность передачи информации на персональный компьютер.

Система визуализации области разряда

Для визуализации процессов, происходящих при инициации взрыва проводника в межэлектродном пространстве высоковольтного трансформатора, заполненном трансформаторным маслом, применяется высокоскоростная камера VS-FAST фирмы ЗАО «Видеоскан». В камере VS-FAST используется 1.3-мегапиксельный (1280 на 1024 пикселя) цветной CMOS-сенсор фирмы Micron. Камера обеспечивает ввод изображений со скоростью до 488 полных кадров в секунду. Связь камеры с компьютером осуществляется через плату контроллера VS2001. Контроллер устанавливается в PCI слот компьютера. Сохраненные в буферной памяти кадры перекачиваются

в компьютер, где их можно обрабатывать и записывать на жесткий диск. В камере VS-FAST используется сенсор фирмы Micron с диагональю 19.7 мм. Поэтому пространственное разрешение системы составит около 200 мкм. Увеличение частоты кадров ν можно обеспечить путем уменьшения числа строк N вводимого изображения $\nu = 5 \times 10^5/N$. Достаточное для большинства задач число строк $N = 200$ позволяет увеличить частоту до 2500 кадров в секунду. Объем памяти системы – более 15000 кадров в данном режиме. Задачей скоростной визуализации является изучение динамики основных процессов, протекающих в межэлектродном промежутке с характерным размером около 100 мм общей длительностью 10–20 мс. При полнокадровой съемке с экспозицией 10–100 мкс регистрируется около 10 кадров; их число можно увеличить в несколько раз за счет увеличения частоты кадров до 500 кадров в секунду.

Эксперименты проводились на созданной нами установке, представляющей собой конденсаторную батарею максимальной емкостью 0.1Ф (в зависимости от эксперимента емкость можно менять, подключая или отключая разные секции батареи), заряжаемую до максимального напряжения 5 кВ, которая через игнитронные ключи коммутируется на проволоку. Бак трансформатора, в котором находится проволока, заполнен трансформаторным маслом, кроме того, в бак помещен имитатор, симулирующий геометрию реальной активной части трансформатора. Также, в баке установлено устройство, позволяющее насыщать трансформаторное масло различными газами (азот либо элегаз).

Данная установка позволяет измерять следующие параметры: мгновенное значение тока разряда (с помощью пояса Роговского, интегратора и осциллографа), мгновенное значение напряжения на разрядном промежутке (с помощью делителя напряжения и осциллографа). Принципиальным отличием данного эксперимента от экспериментов по демпферной защите пористыми металлами, состоит в том, что в установку введены два пьезодатчика давления, позволяющие регистрировать картину развития взрывной волны в баке трансформатора. Данный эксперимент проводился при следующих параметрах: емкость батареи 0.05 А (половина батареи), напряжение заряда батареи 1.5 кВ, масло перед экспериментом насыщалось азотом.

Результаты эксперимента

А) Поведение тока и напряжения:

Как видно из осциллограмм тока и напряжения (рис. 10.44, 10.45.), в момент времени, соответствующий 6 мс на осциллограмме (соответствует срабатыванию игнитронных ключей) происходит резкий скачок напряжения до 1.7 кВ при этом также начинается быстрый рост тока в цепи. В течение примерно 0.5 мс рост напряжения прекращается и начинается резкий спад напряжения до примерно 250 вольт, после чего напряжение начинает падать гораздо медленнее и спадает до нуля примерно через 10 мс. Резкий скачок напряжения в первую миллисекунду процесса соответствует плавлению проволоки, а дальнейший медленный спад соответствует горению дуги в разрядном промежутке. При этом ток в первые 2 мс процесса плавно растет, достигая максимума в 25 кА, а дальше в течении

оставшегося времени процесса продолжает плавно падать достигая нуля в конце процесса.

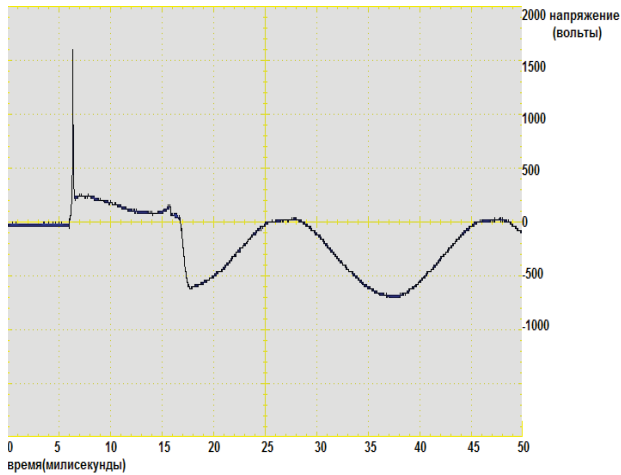


Рис. 10.44. Осциллограмма напряжения на разрядном промежутке

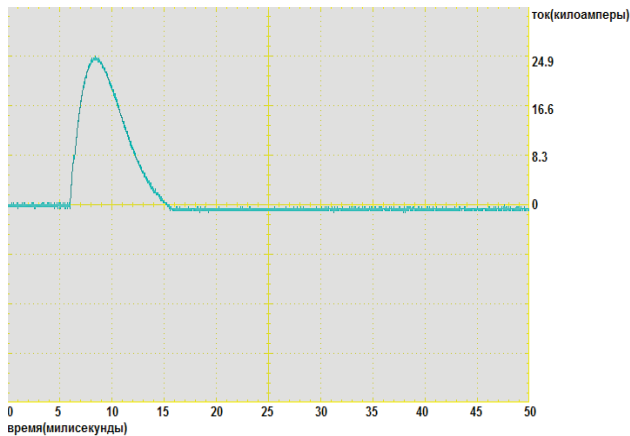


Рис. 10.45. Осциллограмма тока разряда

Б) Поведение давления:

Как видно из рис. 10.46 и 10.47, на первый датчик (ближний к корпусу трансформатора) волна приходит в момент времени 3.14 секунды с момента начала записи давления. Максимальная амплитуда, которой достигает волна соответствует примерно 2.25 атм. Весь процесс, в течение которого удается получить сигнал с датчика давления, отличный от уровня помех, занимает примерно 110 мс (в момент времени, примерно 3.25 с. сигнал с датчика давления сливается с уровнем помех), период колебания волны составляет примерно 27 мс.

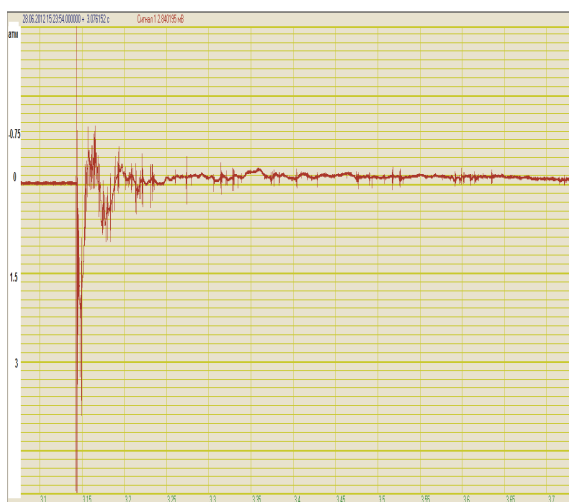


Рис. 10.46. Сигнал с первого датчика (точно)

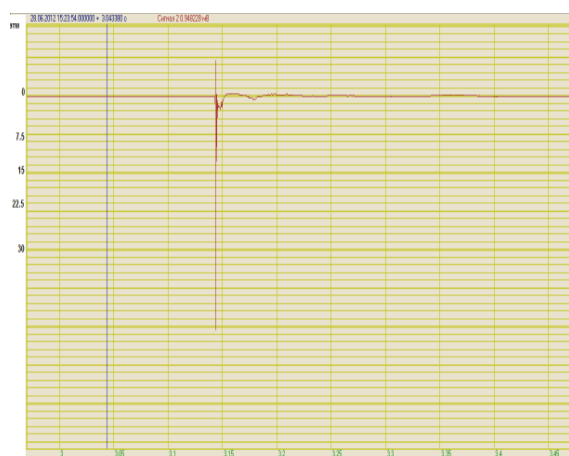


Рис. 10.47. Сигнал со второго датчика давления (грубо)

Осмотр макетного образца после испытаний

В последовательности испытаний энергия конденсаторной батареи увеличивалась. Перед последним испытанием изменения в конструкции трансформатора не замечены, за исключением откола стекла смотрового окна на месте крепления. После последнего испытания наблюдались следующие изменения:

1) деформация наклонного участка крышки в оконной области – лист выгнут наружу на 10–15 мм;

2) появилась трещина в сварном шве между фланцем корпуса и подъемным крюком, крюк развернут относительно фланца по сравнению с его положением до испытаний; появилась продольная трещина в подъемном крюке; появилась трещина в сварном шве между подъемным крюком и вертикальным наружным уголком (элемент жесткости корпуса);

- 3) общая бочкообразность плоских стенок корпуса стала 25–30 мм;
- 4) появились сколы на листе из органического стекла смотрового окна в районе крепежных отверстий.

Выводы по результатам осмотра:

1) Все обнаруженные и описанные деформации элементов трансформатора вызваны повышением избыточного давления внутри корпуса выше уровня, предусмотренного техническими характеристиками трансформатора (0,05 МПа).

2) Разгерметизация корпуса (трещина) образовалась вследствие вздутия плоской грани корпуса вблизи днища внутренним давлением. Причём вертикальный уголок (ребро жёсткости корпуса) приварен к плоской грани корпуса, но не доведён до днища и не приварен к нему. Такая особенность конструкции при общем раздутии корпуса привела к значительному изгибу плоской грани корпуса и достижению в радиусе 15–30 мм вокруг сварного шва предела текучести в материале и образованию трещины. Из трещины сочилось масло в виде отдельных капель.

Выводы.

1. Макетный образец с защитой корпуса трансформатора созданием и поддержанием в пристеночной области пузырьков газа работоспособен при коротком замыкании с параметрами дуги $I=49$ кА (примерно втрое больше, чем при коротком замыкании аналогичного трансформатора в сети напряжением 10,5 кВ) и вкладываемой энергии $E=200$ кДж.

2. При коротком замыкании с параметрами: $I=59$ кА, $E=312$ кДж произошла разгерметизация корпуса в результате образования небольшой трещины, которая с точки зрения взрыво- и пожаробезопасности не представляет никакой угрозы.

3. Создание и поддержание пузырьков газа в пристеночной области бака трансформатора является эффективным способом создания взрывобезопасного маслonaполненного трансформатора.

4. Проведенные испытания показали, что после некоторой доработки макетного образца можно создать опытный образец взрывобезопасного маслonaполненного трансформатора напряжением 220/110 кВ.

Предложенный способ и устройство для его осуществления решают техническую задачу защиты трансформатора за счет обеспечения рабочего давления в пределах заданного значения независимо от мощности КЗ и времени его действия, что достигается применением в качестве охлаждающей жидкости смеси масла и элегаза. Часть охлаждающего масла в трансформаторе замещается элегазом, равномерно распределенным по объему масла в виде пузырьков, что достигается непрерывной откачкой смеси масла и элегаза из верхней части и нагнетанием ее в нижнюю часть корпуса трансформатора через кольцевой трубопровод с насосом, при этом вертикальная составляющая скорости масла в кольцевом трубопроводе превышает скорость всплывания пузырьков элегаза.

Использование в качестве охлаждающей жидкости смеси масла и элегаза в трансформаторах высокой мощности делает систему саморегулирующейся, так как пузырьки элегаза, равномерно распределенные в объеме масла,

будут играть роль демпфирующего слоя, сжатие которого позволяет осуществлять гашение гидродинамической волны, возникающей в емкостях маслонаполненного оборудования при КЗ за счет увеличения полезного объема камеры.

Обеспечение в кольцевом трубопроводе превышения вертикальной составляющей скорости масла по сравнению со скоростью всплывания пузырьков элегаза необходимо для предотвращения скапливания элегаза в верхней части трубопровода. Поставленная техническая задача решается тем, что верхняя часть корпуса силового трансформатора выполнена суживающейся и соединена кольцевым трубопроводом с насосом для циркуляции смеси диэлектрического масла и элегаза с нижней частью трансформатора. При этом трубопровод в нижней части трансформатора снабжен коллектором.

Литература

1. Нигматуллин Р.И. Динамика многофазных сред. Часть I. Москва: Наука, Гл. Ред. физ.-мат. лит., 1987. – 404 с. Часть II. 1987–360 с.
2. Накоряков В.Е., Покусаев Б.Г., Шребер И.Р. Волновая динамика газо- и парожидкостных сред. Москва: Энергоатомиздат. 1990–240 с.
3. Son E.E. Multiphase Theory based on Phase Indicators The Physics of Compressible Turbulent Mixing. 2004, Cambridge. UK.
4. Ando K. Effects of Polydispersity in Bubbly Flows, PhD Thesis, California Institute of Technology, Pasadena, California, 2010.
5. Zhang, Z.D. & Prosperetti, A. 1994 Ensemble-averaged equations for bubbly flows. *Phys. Fluids* 6, 2956–2970.
6. Van Wijngaarden, L. 1968. On the equations of motion for mixtures of liquid and gas bubbles. *J. Fluid Mech.* 33, 465–474.
7. Drew D.A., Passman S.L. Theory of Multicomponent Fluids Springer, 1998
8. Рахматулин Х.А. // Прикладная механика и математика 1956, т. 20, №2
9. Нигматуллин Р.И. // Прикладная механика и математика 1970, т. 34, №6
10. Нигмауллин Р.И. и др. Общие уравнения движения многофазных многокомпонентных монодисперсных систем с химическими реакциями и процессами тепло- и массопереноса // Теоретические основы химической технологии 1977, т. 11, № 2.
11. Данилов И.М., Сон Э.Е. Моделирование газожидкостного химического реактора с диспергированной средой // ТВТ. 2010. Т. 48. № 4. С. 600.
12. Данилов И.М., Иориш В.С., Сон Э.Е.. Моделирование распространения волны химического превращения по проточному реактору с микропузырьковой средой // ТВТ 2011, том 49, № 2, с. 1–10.
13. Данилов И.М., Сон Э.Е. Гетерогенная реакция окисления в микропузырьковой среде // Химическая физика, 2011, том 30, № 4, с. 21–26.
14. Danilov and E. Son Shock wave in a bubble flow with high gas content // EPL volume 94 (2011) 54001 (doi: 10.1209/0295–5075/94/54001).
15. Гарипов Р.М. Замкнутые уравнения движения жидкости с пузырьками.- ЖПМТФ, 1973, № 6, с. 3–24.

16. Ляхов Г.М. Ударные волны в многокомпонентных средах. – Изв. АН СССР. ОТН. Механика и машиностроение, 1959, № 1, с. 46–49.
17. Паркин Б., Гилмор Ф., Бруд Г. Ударные волны в воде с пузырьками воздуха. – В кн.: Подводные и подземные взрывы. Москва: Мир, 1972, с. 152–258.
18. Campbell I.J., Pitcher A.S. Shock waves in a liquid containing gas bubbles. – Proc. Roy. Soc. Ser. A, 1958, vol. 243, N 1235, p. 534–545.
19. Zwicks S.A. Behavior of small permanent gas bubbles in a liquid. – J. Math. and Phys., 1958, vol. 37, N 3; 1959, vol. N h.
20. Ушаков В.Я., Климкин В.Ф., Коробейников С.М., Лопатин В.В. Пробой жидкостей при импульсном напряжении. Томск. Изд-во НТЛ, 2005. 488 с.
21. Методы исследования плазмы. /Под ред. В.Лохте-Хольтгревена, М., Мир, 1971, 552 с.
22. Schaller R., Hollenstein Ch., Rappaz M., Wälder G., Winter J. Characterization of electrical discharge machining plasmas THÈSE NO 3542 (2006) Lausanne, EPFL 2006.
23. Electrohydrodynamic Instability of Fluid Jet in Microgravity [Текст] / Aksenov, A.A., Gudzovsky, A.V., Serebrov, A.A. // Proc. of 5th Int. Symposium on Computational Fluid Dynamics (ISCFD), Aug. 31–Sept. 3, 1993, Sendai, Japan, Japan Society of Computational Fluid Dynamics, 1993, Vol.1, pp 19–24.
24. Элегаз (гексафторид серы SF₆) // Интернет-ресурс <http://sil-trans-form.ru/sf6> [проверено 02.04.2012].
25. Элегаз и его свойства // <http://electricalschool.info/main/visokovoltny/359-jelegaz-i-ego-svojstva.html> [проверено 02.04.2012].
26. A Drag Coefficient Correlation / Schiller, L. and A. Naumann // VDI Zeits., 1933, Vol. 77, pp. 318–320.
27. Multiphase Flows with Droplets and Particles / Crowe, C., Sommerfeld, M., and Tsuji, Yu. // CRC Press LLC, 1998, 471 p.
28. Modelling of Turbulence in Bubbly Flows / Krepper, E., Schmidtke, M., Lucas, D. // 7-th International Conference on Multiphase Flow ICMF 2010, Tampa, FL USA, May 30–June 4, 2010, 7 p.
29. Panov V.A., Kulikov Y.M., Son E.E., Tyuftyaev A.S. Electrical Breakdown Strength of Liquid-Gas Bubble Mixtures of Transformer Oil with Sulfur Hexafluoride and Air // High Temperature 2014, Vol.52. No.5. pp.770-773.
30. Данилов И.М. Дисс. канд. физ.-мат. н. «Течения газожидкостных сред с высоким газосодержанием и гетерогенными химическими реакциями» спец.01.02.05 – механика жидкости газа и плазмы. Московский физико-технический институт. Москва. 2010.
31. Van den Berg Thomas H., Macromol. Mater. Eng., 296 (2011) 230
- 32 Wen Cheng. Flow Measurement and Instrumentation 16 (2005) 35–46.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Электроэнергетика является одной из основных отраслей, задачей которой является снабжение электроэнергией из областей с дешевым производством электроэнергии на гидростанциях, в основном в Сибирской части России, в Европейскую часть, где сосредоточена промышленность, поэтому существует необходимость передачи электроэнергии. Высоким КПД обладает линия с высоким напряжением передачи электроэнергии, а потребители, как правило, используют низкое напряжение, поэтому необходимостью является использование высоковольтных трансформаторов, из которых наиболее экономически эффективными являются маслонаполненные высоковольтные трансформаторы. Все используемые в трансформаторах материалы подвержены деградации, т.е. старению материалов, вследствие чего происходит электрический пробой и короткое замыкание. В результате возникает электрическая дуга, которая приводит к взрыву трансформатора. Создание взрывобезопасных трансформаторов обычными известными для электроэнергетики методами оказывается неэффективным, поэтому необходимы новые физические исследования процессов и материалов для создания новых систем взрывозащищенного электрооборудования. Примером решения этой задачи после аварии в Чагино с 2005 г. была программа работ ОАО «ФСК ЕЭС» с привлечением РАН и университетов к работам по электрофизике, теплофизике, численному моделированию, созданию стендов и макетных образцов высоковольтного маслонаполненного оборудования. Часть проектов была реализована совместно с ОАО «Электрозавод».

Разработанные методы и технологии могут быть применены не только для защиты электрооборудования, но и в других областях электроэнергетики. Работы в этой области являются перспективными и далеко не ограничиваются описанными результатами. Опыт выполненных работ показывает, что здесь необходимо взаимодействие фундаментальной и прикладной науки, а также новых инженерных подходов для решения важнейшей проблемы взрывобезопасности.

То, что проблема до сих пор является актуальной, следует из регулярных аварий, взрывов и пожаров на трансформаторных подстанциях. Вот лишь одно из последних сообщений в июле 2019 г.: «Минэнерго опубликовало подробности аварийного отключения трех энергоблоков Калининской АЭС. Оно произошло в 5:05 после короткого замыкания на трансформаторе тока 750-киловольтной линии. Автоматическая защита отключила первую систему шин распределительной станции – она преобразует выработанную АЭС электроэнергию перед отправкой ее в Единую энергосистему России. Одновременно сработала автоматика, отключившая три из четырех реакторов станции».

В данной монографии рассмотрены фундаментальные проблемы электрофизики высоковольтных явлений в газожидкостных системах, приведены данные по возникновению частичных разрядов в высоковольтных изоляционных жидкостях, экспериментальные исследования электрофизических свойств трансформаторного и растительных масел, данные о тепло-

физических свойствах трансформаторного масла, полученные на ударных трубах, проведено численное моделирование гидродинамики и теплообмена на разработанных модулях пакетов программ Flow Vision и Gas Dynamic Tool, моделирование взрывов и кинетики напряженно-деформированного состояния ВМЭО, численное моделирование выполнено на пакете-LS DYNA; описание динамических методов обеспечения взрывобезопасности ВМЭО. Проведен анализ системы «SERGI» и предложены новые эффективные решения и технологии создания взрывобезопасного ВМЭО, описание предлагаемых демпферных систем защиты корпусов, приведены результаты экспериментов и методов расчета пористых металлов, используемых для защиты от взрывных нагрузок, и их возможное применение для защиты высоковольтных трансформаторов, приведены результаты экспериментов с использованием демпферных материалов по методу создания сжимаемой среды и трансформаторного масла для перехода от резкого гидравлического удара вследствие короткого замыкания и образования ударной волны в жидкости к рассредоточенному воздействию «размытого» импульса в газожидкостной среде, что достигается введением малой объемной доли элегаза в трансформаторное масло. Этот метод снижения нагрузок может использоваться не только для высоковольтного оборудования, но и в ряде других задач, связанных с физикой взрыва в газожидкостных системах.

Выполненные работы, представленные в данной книге, являются лишь очень небольшой частью применения эффектов физики и материаловедения для создания устройств в электроэнергетике. Это относится не только к проблемам взрывобезопасности, но и к большому количеству других задач энергетики. Мы надеемся, что эта книга привлечет внимание как специалистов энергетических компаний, так и ученых и инженеров из различных организаций РАН, отраслевых НИИ и университетов России к разработке нового наукоемкого оборудования для энергетики.

ДЛЯ ЗАМЕТОК

ДЛЯ ЗАМЕТОК

Сон Э.Е., Фортов В.Е., Азмеев Х.Х, Аксенов А.А.,
Бондарь В.С., Бабаева Н.Ю., Гаджиев М.Х., Зицерман В.Ю.,
Киверин А.Д., Коробейников С.М., Куликов Ю.М., Минцев В.Б.,
Панов В.А., Смирнов Б.М., Темис Ю.М., Тюфтяев А.С.

ЭЛЕКТРОФИЗИКА И ВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТЬ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО МАСЛОНАПОЛНЕННОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

Подписано в печать 03.12.2019
Формат 70x100/16. Бумага офсетная
Гарнитура Times
Уч.-изд. л. 24,73. Усл.-печ. л. 30,16
Заказ № 2591.4. Тираж 300 экз.

Издатель – Российская академия наук

Публикуется в авторской редакции

Отпечатано в типографии ООО «Принт».
426035, г. Ижевск, ул. Тимирязева, 5

Издается по решению Научно-издательского совета
Российской академии наук (НИСО РАН)
и распространяется бесплатно