

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ БЕЗОПАСНОГО РАЗВИТИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(ИБРАЭ РАН)

На правах рукописи



МОСУНОВА НАСТАСЬЯ АЛЕКСАНДРОВНА

**РАЗВИТИЕ НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИХ ОСНОВ И РАЗРАБОТКА
ИНТЕГРАЛЬНОГО ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ
МОДЕЛИРОВАНИЯ РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВОК НА БЫСТРЫХ
НЕЙТРОНАХ С ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИМИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯМИ**

05.14.03 — Ядерные энергетические установки, включая проектирование, эксплуатацию
и вывод из эксплуатации

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
доктора технических наук

Научный консультант:
д.ф.-м.н. В.Ф.Стрижов

Москва, 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	5
1 Основные характеристики интегрального программного комплекса ЕВКЛИД/V1 ..	23
1.1 Вводные замечания к разделу 1	23
1.2 Общая информация	24
1.3 Объекты моделирования	26
1.4 Назначение	26
1.5 Функциональность, перечень определяющих процессов и явлений	28
1.6 Заключительные и обобщающие замечания по разделу 1	32
2 Модели теплогидравлических, нейтронно-физических и термомеханических процессов в интегральном программном комплексе ЕВКЛИД/V1	34
2.1 Вводные замечания к разделу 2	34
2.2 Моделирование теплогидравлических процессов в контурах и активной зоне реакторных установок на быстрых нейтронах с натриевым, свинцовым или свинцово- висмутовым теплоносителем	36
2.3 Моделирование процессов, протекающих в твэле.....	64
2.4 Моделирование нейтронно-физических процессов, протекающих в а.з. реакторных установок на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем.....	73
2.5 Базовые модели модуля расчёта выгорания	75
2.6 Базовые модели модуля расчёта остаточного энерговыделения.....	76
2.7 Заключительные и обобщающие замечания по разделу 2	77
3 База данных по свойствам материалов и теплоносителей	81
3.1 Вводные замечания к разделу 3	81
3.2 Общие сведения.....	82
3.3 Правила использования свойств материалов из базы данных в программном модуле	85
3.4 Оцененные данные по теплофизическим свойствам жидкого свинцового теплоносителя.....	87

3.5	Теплофизические свойства натриевого теплоносителя	96
3.6	Теплофизические свойства жидкого свинцово-висмутового теплоносителя	98
3.7	Теплофизические свойства водяного теплоносителя	100
3.8	Теплофизические свойства неконденсируемых газов	101
3.9	Свойства материалов ТВЭЛА	112
3.10	Заключительные и обобщающие замечания по разделу 3	112
4	Методика интеграции отдельных программных модулей в интегральные программные комплексы, подходы к программной реализации интегрального программного комплекса ЕВКЛИД/V1	114
4.1	Вводные замечания к разделу 4	114
4.2	Методика и технология интеграции программных модулей, организация и управление расчётом	115
4.3	Общие принципы программной реализации	120
4.4	Пакет поставки интегрального программного комплекса ЕВКЛИД/V1 и основные принципы программной реализации автономных модулей	122
4.5	Технические характеристики вычислительных систем, требуемые для работы интегрального программного комплекса ЕВКЛИД/V1	125
4.6	Текстовые входные файлы	126
4.7	Текстовые выходные файлы	129
4.8	Препроцессор для задания входных данных	129
4.9	Постпроцессор для отображения результатов расчётов SmartViewer	130
4.10	Перечень данных, которыми обмениваются программные модули	131
4.11	Параллельные вычисления	132
4.12	Заключительные и обобщающие замечания по разделу 4	150
5	Методика оценки погрешностей результатов расчётов, получаемых по программным комплексам	152
5.1	Вводные замечания по разделу 5	152

5.2	Методика оценки погрешностей результатов расчётов, получаемых по программным комплексам	152
5.3	Заключительные и обобщающие замечания по разделу 5	163
6	Верификация программного комплекса ЕВКЛИД/V1	165
6.1	Вводные замечания к разделу 6	165
6.2	Матрица верификации применительно к действующим и проектируемым реакторным установкам с натриевым теплоносителем и проектируемым реакторным установкам со свинцовым или свинцово-висмутовым теплоносителем	166
6.3	Основные результаты верификации.....	210
6.4	Необходимость получения дополнительных экспериментальных данных.....	216
6.5	Заключительные и обобщающие замечания по разделу 6	220
7	Анализ отдельных режимов нормальной эксплуатации и нарушений нормальной эксплуатации РУ на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем.....	222
7.1	Вводные замечания к разделу 7	222
7.2	Моделирование РУ БРЕСТ-ОД-300	223
7.3	Моделирование РУ БН-1200	262
7.4	Заключительные и обобщающие замечания по разделу 7	288
	Заключение.....	290
	Список сокращений и условных обозначений	292
	Словарь терминов.....	300
	Список литературы.....	301
	Список иллюстративного материала	329

Введение

Актуальность темы исследования. В соответствии с Энергетической стратегией России на период до 2030 г. [1] в нашей стране должны быть созданы инновационные экспериментальные и коммерческие атомные электростанции (АЭС) с реакторными установками (РУ) на быстрых нейтронах с жидкометаллическими теплоносителями, примерами которых служат РУ БРЕСТ-ОД-300 (свинцовый теплоноситель) и БН-1200 (натриевый теплоноситель), что обеспечит возможность реализации устойчивого развития атомной энергетики с замыканием ядерного топливного цикла [2, 3].

Необходимость создания таких новых объектов ядерной техники, разработки их оборудования, компонентов и систем, обеспечения надёжности, безопасности, экологической приемлемости, выявления конкурентоспособности ядерных технологий ставит перед атомной отраслью задачи, охватывающие все аспекты развития объектов ядерной техники: от вопросов проектирования и конструирования реакторных установок до проблем обращения с радиоактивными отходами на завершающих стадиях ядерного топливного цикла.

Обязательным атрибутом любой деятельности в области использования атомной энергии является обеспечение безопасности. Требования к обеспечению безопасности определяются федеральными нормами и правилами в области использования атомной энергии [4], международно признанными руководствами по безопасности [5], которые хотя и носят рекомендательный характер, но с учётом глобального мирового присутствия Госкорпорации «Росатом», фактически становятся обязательными для российских проектов АЭС, а также требованиями конкретных стран-заказчиков. В соответствии с ними безопасность проекта АЭС должна быть обоснована путём проведения детерминистических и вероятностных анализов безопасности и сопровождаться оценками погрешностей и неопределённостей получаемых результатов. Анализ безопасности реакторных установок проводится путём выполнения численных исследований характерных режимов их работы с использованием программных комплексов (программных средств, программ для электронно-вычислительных машин (ЭВМ), расчётных кодов) различного уровня сложности и детализации. При этом моделирование нейтронно-физических, теплогидравлических, физико-химических, механических и других процессов с учётом обратных связей, которые в ряде случаев могут играть главенствующую роль и существенным образом отразиться на характеристиках моделируемого объекта, требует создания и использования интегральных программных комплексов, являющихся квинтэссенцией всех разработок и позволяющих выполнять взаимосогласованное

моделирование различных физических процессов. Важным требованием к возможности практического использования программных комплексов для обоснования безопасности объектов использования атомной энергии является прохождение их экспертизы в организации научно-технической поддержки уполномоченного органа государственного регулирования безопасности. Значимость экспертизы закреплена в статье 26 федерального закона «Об использовании атомной энергии».

Следует отметить, что со времён СССР и до настоящего времени наша страна удерживает первенство по разработке проектных решений и эксплуатации реакторных установок на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем. Единственные действующие на начало 2018 г. в мире энергетические реакторы с натриевым теплоносителем – это БН-600 и БН-800. За время их эксплуатации накоплены массивы экспериментальных данных, которые не имеют мировых аналогов, предоставляющих уникальную базу для отработки теоретических подходов и верификации интегральных программных комплексов.

Научно-техническая проблема, на решение которой направлена диссертационная работа, заключается в разработке соответствующего современным требованиям интегрального программного комплекса, предназначенного для моделирования режимов нормальной эксплуатации и нарушений нормальной эксплуатации реакторных установок на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем (натриевым, свинцовым или свинцово-висмутовым), использующих смешанное нитридное уран-плутониевое топливо, позволяющего исследовать тепловые, гидравлические и нейтронно-физические процессы в связанной постановке с целью создания новых объектов ядерной техники, обоснования их безопасной эксплуатации, повышения их технико-экономических показателей.

Актуальность развития научно-методических основ и разработки интегрального программного комплекса обусловлена следующими факторами [6]:

– ускоренной реализацией в России программы по разработке проектов и сооружению АЭС с реакторными установками на быстрых нейтронах с жидкометаллическими теплоносителями (проектное направление «Прорыв»), что требует углублённого анализа и систематизации накопленных в предшествующие годы научных знаний, а также опыта эксплуатации промышленных реакторных установок с жидкометаллическим теплоносителем, определённой корректировки и расширения подходов к разработке и обоснованию программных комплексов, в том числе, в соответствии с современными международными требованиями, совершенствования методики построения интегральных расчётных кодов с учётом прогресса в области вычислительных методов и систем, повышения точности расчётных обоснований;

– степенью разработанности в России и мире научно-методических основ и программных средств по теме диссертационного исследования, а именно:

- 1) отсутствием в России интегрального программного комплекса, описывающего все процессы, важные с точки зрения обоснования безопасности инновационных проектов РУ на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем, в частности, процессы, протекающие при межконтурной течи парогенератора РУ с тяжёлым жидкометаллическим теплоносителем, и процессы, протекающие в твэлах со смешанным нитридным уран-плутониевым (СНУП)¹ топливом, позволяющего на единой методической основе проводить принципиально важные расчёты режимов работы реакторных установок на быстрых нейтронах с разными теплоносителями и типами топлива, в том числе, с целью получения сравнительной характеристики различных вариантов загрузки активной зоны;
- 2) отсутствием в России верифицированного и прошедшего экспертизу в организации научно-технической поддержки уполномоченного органа государственного регулирования безопасности [7] интегрального программного комплекса для обоснования безопасности реакторных установок на быстрых нейтронах с тяжёлым жидкометаллическим теплоносителем и для обоснования безопасности реакторных установок на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем с твэлами со СНУП топливом;
- 3) ориентацией зарубежных расчётных кодов на конструктивные особенности иностранных проектов реакторных установок и отсутствием возможности доработки соответствующих программных средств под нужды российских проектов;

– уже реализованными ограничениями на использование ряда зарубежных программных комплексов для обоснования безопасности российских проектов и возникновением в этой связи рисков несвоевременного выполнения программы по разработке российских проектов АЭС с РУ на быстрых нейтронах;

– переходом к фазе практической реализации ключевых принципов стратегии цифровых продуктов Госкорпорации «Росатом» и следующей из этого необходимости обеспечения коммерциализируемости разрабатываемого программного обеспечения путём использования передовых физических моделей и численных методов, современных средств

¹ СНУП топливо рассматривается в качестве одного из вариантов для проекта РУ БН-1200 (наряду с МОКС топливом) и основного варианта для РУ БРЕСТ-ОД-300.

подготовки исходных данных (препроцессор) и отображения результатов расчётов (постпроцессор), обеспечения универсальности для реакторных установок различных типов, в том числе зарубежных, и повышения достоверности получаемых результатов благодаря верификации на данных с действующих в России и не имеющих аналогов в мире реакторных установок на быстрых нейтронах.

Степень разработанности темы исследования. Практика использования интегральных программных комплексов для анализа и обоснования безопасности РУ в мире насчитывает более 50 лет. Первые работы были связаны с созданием и использованием подобных программных комплексов для РУ с водяным теплоносителем. Существенный рост количества публикаций, посвящённых интегральным расчётным кодам для анализа и обоснования безопасности реакторов на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем, произошёл в последние годы и связан с разработкой проектов быстрых реакторов с натриевым, свинцовым или свинцово-висмутовым теплоносителями в различных странах: БН-1200, БРЕСТ-ОД-300 (Россия), ASTRID (Франция), CFR600, CLEAR (Китай), ALFRED (Румыния), MYRRHA (Бельгия) и других [6].

Краткий обзор российских кодов, используемых при обосновании безопасности РУ с натриевым теплоносителем, можно найти в работе [8]. При разработке проектов РУ БРЕСТ-ОД-300 и БН-1200 конструкторские организации РУ (АО «НИКИЭТ» и АО «ОКБМ Африкантов» соответственно) используют расчётные коды собственной разработки DINAR (АО «НИКИЭТ») [9] и BURAN (АО «ОКБМ Африкантов») [10], каждый из которых ориентирован на конкретный тип теплоносителя: DINAR – на свинец, BURAN – на натрий (описываются только однофазные процессы в натриевом теплоносителе). В коде DINAR используется пространственный диффузионный нейтронно-физический модуль, в коде BURAN – модуль точечной кинетики. У научного руководителя проектов реакторных установок на быстрых нейтронах – АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» – также имеются коды собственной разработки для обоснования безопасности проектов РУ с натриевым теплоносителем. Это код COREMELT [11, 12], содержащий модуль многокомпонентной многофазной теплогидравлики в R-Z геометрии в приближении пористого тела и пространственный нейтронно-физический модуль (диффузионное или кинетическое приближения), и код GRIF [8], содержащий трехмерную теплогидравлическую модель также на основе модели «пористого тела» и точечную модель нейтронной кинетики. Во всех указанных выше кодах модуль оценки работоспособности твэла отсутствует. Единственным аттестованным в Ростехнадзоре программным средством является код BURAN. Область верификации остальных кодов ограничена. Все вышеуказанные российские коды разработаны несколько десятилетий назад на современном для того времени уровне знаний и технических

возможностей, поэтому они нуждаются в программной модернизации, углублении и развитии научно-методических подходов, использованных при их создании, расширении области верификации.

Наиболее известными зарубежными интегральными расчётными кодами, разработанными для анализа и обоснования безопасности РУ с натриевым теплоносителем, являются коды SAS4A/SASSYS-1 (США) [13], SIMMER-III(IV) (Япония, Франция, Германия, Бельгия, Швейцария, Италия) [14, 15]. Коды SAS4A/SASSYS-1 описывают стационарные режимы, переходные процессы, проектные аварии и сценарии тяжёлых аварий вплоть до разрушения тепловыделяющих сборок. Рассматриваются все контуры АЭС и все основные системы (активная зона, теплообменники, насосы, клапаны, турбины, конденсаторы, трубопроводы). Теплогидравлические процессы описываются в одномерном (канальном) приближении. Моделирование твэла включает расчёт механического поведения твэла, набухания топлива и выхода радиоактивных благородных газов из топлива, химического взаимодействия топливо – оболочка. Описываются оксидное и металлическое топливо. Код валидирован с использованием, в том числе, базы данных по эксплуатационным режимам реактора EBR-II до выгорания 19 % т.а. Что касается интегрального расчётного кода SIMMER-III(IV), то основной областью его применения является моделирование процессов разрушения активной зоны в РУ с натриевым теплоносителем, хотя в последние годы область применения была расширена на иные типы реакторных установок: жидкосолевые, охлаждаемые водой при сверхкритическом давлении и другие. Интегральный расчётный код содержит многокомпонентную многофазную модель теплогидравлики (двумерную – SIMMER-III и трёхмерную – SIMMER-IV), твэльный модуль и пространственный нейтронно-физический модуль (как двумерный, так и трёхмерный). Одним из основных достоинств интегрального расчётного кода SIMMER-III(IV) является его верификация на широкой базе экспериментальных данных применительно к процессам разрушения активной зоны для реакторов с натриевым теплоносителем, соответственно модели данных процессов детально проработаны.

Следует отметить, что во всех зарубежных расчётных кодах (в том числе, SAS4A/SASSYS-1, SIMMER-III(IV)) отсутствуют модели поведения ЧНУП топлива, что связано с ориентацией стран на использование в быстрых реакторах смешанного оксидного уран-плутониевого топлива (МОКС) или металлического топлива.

Расчётные коды, о которых было сказано выше, специально разрабатывались применительно к РУ с жидкометаллическим теплоносителем. В то же время достаточно распространённой практикой является адаптация интегральных кодов, разработанных и широко

используемых для водяных теплоносителей, к моделированию реакторных установок на быстрых нейтронах, прежде всего, с натриевым теплоносителем. Например, на базе хорошо известного интегрального кода ASTEC (Франция) создана версия ASTEC-Na [16] для натриевого теплоносителя. В перспективе планируется расширение области применимости кода на РУ с тяжёлым жидкометаллическим теплоносителем (ТЖМТ) (свинец, свинец-висмут) и выпуск версии ASTEC-LM (Liquid Metal). Интегральный код MELCOR 2.1 (США) дополнен моделями для описания процессов, протекающих в жидкометаллических теплоносителях [17]. При этом в настоящее время верификация данных кодов на необходимых и достаточных объёмах экспериментальных данных отсутствует. Кроме того, указанные коды не содержат модуля пространственной кинетики, играющего важную роль в корректном описании ряда процессов, протекающих в РУ на быстрых нейтронах.

В России по аналогичному пути пошли при создании кода СОКРАТ-БН [18], который развивался на основе аттестованного кода СОКРАТ, разработанного для РУ технологии ВВЭР.

Кроме адаптации известных кодов для водяного теплоносителя к жидкометаллическим теплоносителям, в различных странах разрабатываются новые интегральные коды [19 – 25]: FRENETIC, NTC, ASTERIA-FBR, SHARP, которые, как правило, состоят из трёх основных расчётных модулей – теплогидравлического, нейтронно-физического и твэльного. При этом в кодах FRENETIC и NTC моделирование поведения твэла ограничивается решением задачи теплопроводности, что не позволяет проводить анализ безопасности по отношению к целостности оболочек твэлов и выходу продуктов деления и частиц топлива в теплоноситель первого контура.

Вышесказанное подтверждает тезисы о том, что:

- существующие отечественные интегральные коды для РУ на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем были разработаны несколько десятилетий назад и нуждаются в модернизации в соответствии с современным уровнем теоретических знаний, вычислительных методов, тенденций в области программной реализации и подходов к интеграции программных модулей;
- в настоящее время отсутствует прошедший экспертизу в организации научно-технической поддержки уполномоченного органа государственного регулирования безопасности интегральный расчётный код для обоснования безопасности реакторных установок с тяжёлым жидкометаллическим теплоносителем и с натриевым теплоносителем и СНУП топливом.

Что касается непосредственно функциональных возможностей:

- применительно к отечественным проектам РУ зарубежные расчётные коды можно использовать только для анализа теплогидравлических и нейтронно-физических процессов, поскольку в них отсутствуют модели поведения СНУП топлива. Кроме того, зарубежные коды недоступны российским специалистам для модернизации, доработки и адаптации под особенности отечественных проектов;
- зарубежные расчётные коды верифицированы на базе экспериментальных данных, полученных, в основном, на зарубежных экспериментальных установках. Корректность их применения для отечественных проектов РУ на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем требует выполнения полномасштабной верификации на экспериментальных данных, полученных на российских экспериментальных и промышленных реакторных установках;
- отечественные интегральные коды для РУ на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем не содержат моделей, позволяющих описывать поведение твэла, при том что значения температур оболочки твэла и топлива являются ключевыми параметрами для обоснования безопасности проектов РУ;
- отсутствует отечественный расчётный код, который на единой методической основе позволил бы описать процессы, протекающие как в реакторных установках с натриевым, так и тяжёлым жидкометаллическим теплоносителем;
- большинство отечественных интегральных кодов содержит нейтронно-физические модели, не позволяющие описать распределение поля нейтронов по поперечному сечению тепловыделяющей сборки и моделировать ряд других специфических особенностей, таких как наличие полостей, возникающих при работе системы пассивной обратной связи РУ со свинцовым теплоносителем.

В связи с вышесказанным, в России в 2010 г. стартовал проект «Коды нового поколения»², нацеленный на создание отечественной системы кодов для обоснования проектных решений и безопасности АЭС с реакторными установками на быстрых нейтронах с жидкометаллическими теплоносителями. Под «кодами нового поколения» понимается отчуждаемое коммерциализируемое программное обеспечение, обладающее следующими характеристиками:

- основано на современном уровне теоретических знаний и экспериментальных

² Проект «Коды нового поколения» реализуется в рамках проектного направления «Прорыв» за счёт средств Федеральной целевой программы «Ядерные энерготехнологии нового поколения на период 2010 – 2015 годов и на перспективу до 2020 года».

данных по физическим процессам и явлениям;

- использует эффективные численные алгоритмы;
- написано в соответствии с современными требованиями стандартов языков программирования и адаптировано к современной вычислительной технике;
- имеет дружелюбный интерфейс пользователя;
- снабжено полным пакетом документации (руководство пользователя, руководство программиста, руководство по моделям);
- использует автоматизированную связь с конструкторскими данными (только для многомерных расчётных кодов).

Рассматриваемый в диссертационной работе интегральный программный комплекс был разработан в рамках данного проекта и обладает всеми характеристиками, присущими кодам нового поколения.

Целями работы являются:

1. Развитие научно-методических основ, разработка и верификация интегрального программного комплекса для моделирования режимов нормальной эксплуатации и нарушений нормальной эксплуатации реакторных установок на быстрых нейтронах с натриевым, свинцовым и свинцово-висмутовым теплоносителями с ТВЭлами с оксидным или нитридным топливом и газовым подслоем.

2. Анализ отдельных важных для обоснования безопасности режимов нормальной эксплуатации и нарушений нормальной эксплуатации реакторных установок с жидкометаллическим теплоносителем БРЕСТ-ОД-300 и БН-1200 с использованием разработанного интегрального программного комплекса.

Основные задачи работы:

1. На основе обобщения опыта эксплуатации реакторных установок на быстрых нейтронах и результатов теоретических и экспериментальных исследований составить перечень теплогидравлических и нейтронно-физических процессов и явлений, которые должны моделироваться для корректного описания режимов нормальной эксплуатации и нарушений нормальной эксплуатации действующих и проектируемых реакторных установок с натриевым теплоносителем и проектируемых реакторных установок с тяжёлым жидкометаллическим теплоносителем (свинец или свинец-висмут).

2. На базе современных научных представлений обобщить, систематизировать, проанализировать и выбрать наиболее адекватные, а в необходимых случаях – модифицировать или доработать модели отдельных групп физических процессов (теплогидравлических,

нейтронно-физических и протекающих в твэле) для описания режимов нормальной эксплуатации и нарушений нормальной эксплуатации реакторных установок на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем (ЖМТ) с твэлами с оксидным или нитридным топливом и газовым подслоем.

3. Разработать программные модули: (1) функциональные (теплогидравлический, нейтронно-физический, твэльный) – реализующие моделирование определённых групп физических процессов; (2) сервисные (интегрирующая оболочка, база данных по свойствам материалов и теплоносителей) – для создания на их основе интегрального программного комплекса, предназначенного для моделирования режимов нормальной эксплуатации и нарушений нормальной эксплуатации реакторных установок на быстрых нейтронах с натриевым, свинцовым или свинцово-висмутовым теплоносителями с твэлами с оксидным или нитридным топливом и газовым подслоем.

4. На базе указанных разработок создать интегральный программный комплекс, отвечающий современным тенденциям в области построения программного обеспечения, путём интеграции программных модулей и обеспечения согласованного расчёта разнородных физических процессов.

5. Провести анализ и оценку полноты имеющихся экспериментальных данных в области теплогидравлики, нейтронной физики и процессов, протекающих в твэлах с диоксидным, смешанным оксидным уран-плутониевым и смешанным нитридным уран-плутониевым топливом и газовым подслоем. Разработать матрицы верификации отдельных программных модулей и интегрального программного комплекса в целом.

6. На основе современных подходов к анализу неопределённостей и чувствительности адаптировать и развить существующие наработки в области оценки погрешностей результатов расчётов программным комплексом в виде законченной методики. На разработанной методической основе выполнить верификационные расчёты интегральным программным комплексом по перечню задач из матрицы верификации, провести анализ и обобщение полученных результатов верификационных расчётов, оценить погрешность расчёта отдельных параметров, важных для оценки безопасности РУ на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем.

7. Выполнить расчёты отдельных важных для обоснования безопасности режимов нормальной эксплуатации и нарушений нормальной эксплуатации РУ БН-1200 и БРЕСТ-ОД-300 с использованием разработанного интегрального программного комплекса, провести анализ полученных результатов.

Научная новизна:

1. На современной научной основе обобщены, проанализированы и систематизированы замыкающие соотношения, необходимые для выполнения расчётов в канальном приближении теплогидравлических процессов, протекающих в контурах РУ на быстрых нейтронах с натриевым, свинцовым или свинцово-висмутовым теплоносителем при нормальной эксплуатации и нарушениях нормальной эксплуатации, включая возможность моделирования процессов в водяном контуре и воздушных теплообменниках. На основе этого: 1) верифицирована (доказана путём сравнения с результатами экспериментальных исследований) возможность использования существующих замыкающих соотношений для задач диссертационного исследования; 2) в случае обоснованной необходимости – выполнена модификация существующих и/или разработка новых замыкающих соотношений.

2. Развиты и адаптированы применительно к реакторным установкам на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем и смешанному нитридному уран-плутониевому топливу механистические физико-математические модели, разработанные ранее для описания процессов, протекающих в оксидном топливе водо-водяных реакторных установок.

3. Разработан интегральный программный комплекс ЕВКЛИД/V1³, включающий модели основных процессов и явлений для описания режимов нормальной эксплуатации и нарушений нормальной эксплуатации РУ на быстрых нейтронах с натриевым, свинцовым или свинцово-висмутовым теплоносителем, включающий, в частности:

- модели теплогидравлических процессов в канальном приближении в натриевом (однофазные и двухфазные), свинцовом (пары свинца не моделируются), свинцово-висмутовом (пары свинца и висмута не моделируются) и водяном (однофазные и двухфазные процессы) теплоносителях, содержащих неконденсируемые газы в газовой и жидкой фазах;
- модели теплогидравлических процессов в свинцовом или свинцово-висмутовом теплоносителе при поступлении водяного пара в жидкую фазу тяжёлого жидкометаллического теплоносителя;
- модели для описания поведения твэла с оксидным или нитридным топливом и газовым подслоем;
- модели для описания нейтронно-физических процессов в диффузионном и

³ Буквенно-цифровое обозначение «V1» в наименовании расчётного кода означает его первую версию, буква «V» является сокращением от английского слова «version» (версия).

кинетическом приближениях;

- модели расчёта выгорания топлива и остаточного энергосодержания;
- пре- и постпроцессор для подготовки исходных данных для выполнения расчётов и отображения их результатов.

4. Проанализированы и выбраны наиболее надёжные теплофизические свойства жидкого свинцового теплоносителя, которые реализованы в разработанной базе данных по свойствам материалов и теплоносителей.

5. Развита методика основы интеграции (взаимодействия) отдельных программных модулей в составе интегральных программных комплексов, которые реализованы в виде интегрирующей оболочки.

6. Предложена методика оценки погрешностей результатов расчётов, получаемых с помощью программных комплексов, соответствующая современным подходам к анализу неопределённостей⁴ и чувствительности и включающая оценку неопределённостей, обусловленных точностью используемых моделей физических процессов, входных данных, и вычислительных неопределённостей.

7. Разработаны матрицы верификации интегрального программного комплекса ЕВКЛИД/V1 для действующих и проектируемых реакторных установок с натриевым теплоносителем и проектируемых реакторных установок с тяжёлым жидкометаллическим теплоносителем (свинец или свинец-висмут) для моделирования режимов нормальной эксплуатации и нарушений нормальной эксплуатации.

8. Выполнены верификационные расчёты аналитических задач и экспериментов из матриц верификации с использованием интегрального программного комплекса ЕВКЛИД/V1. На современном методическом уровне определены значения погрешностей расчёта параметров, являющихся определяющими для оценки безопасности РУ.

9. Интегральным программным комплексом ЕВКЛИД/V1 выполнено моделирование отдельных важных для обоснования безопасности режимов нормальной эксплуатации и нарушений нормальной эксплуатации РУ БН-1200 (стационарный режим работы на номинальном уровне мощности, начальная стадия аварии с потерей электроснабжения и отказом средств воздействия на реактивность) и БРЕСТ-ОД-300 (стационарный режим работы на номинальном уровне мощности, ввод полного запаса положительной реактивности, гильотинный разрыв трубки парогенератора).

⁴ Неопределённость – мера рассеяния экспериментальных или расчётных значений.

Теоретическая и практическая значимость работы. Результаты, полученные в ходе диссертационного исследования, позволили:

1. развить научно-методические основы разработки и верификации интегральных программных комплексов, предназначенных для анализа и обоснования безопасности реакторных установок на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем: подходы к построению теоретических моделей, формулировки базовых систем уравнений, обобщённые замыкающие зависимости, систематизированные экспериментальные данные, ранжированные перечни процессов и явлений, современные методики оценки погрешностей результатов расчёта и взаимодействия между отдельными программными модулями. Разработанные научно-методические основы реализованы на практике в интегральном программном комплексе;
2. обеспечить конструкторские организации, организацию – научного руководителя проектов РУ на быстрых нейтронах с жидкометаллическими теплоносителями, а также вовлечённых в соответствующие проекты исследователей современным верифицированным интегральным программным комплексом ЕВКЛИД/V1, обеспечивающим расчётное обоснование безопасности действующих и проектируемых реакторных установок на быстрых нейтронах с натриевым, свинцовым или свинцово-висмутовым теплоносителями⁵;
3. обеспечить независимость расчётного обоснования перспективных проектов отечественных реакторных установок с жидкометаллическим теплоносителем от зарубежных программных средств в области применимости интегрального программного комплекса ЕВКЛИД/V1;
4. выполнить расчётное обоснование безопасности отдельных режимов нормальной эксплуатации и нарушений нормальной эксплуатации РУ БРЕСТ-ОД-300 и БН-1200;
5. включить разработанный интегральный программный комплекс ЕВКЛИД/V1 в полномасштабную расчётную математическую модель опытно-демонстрационного энергокомплекса (ОДЭК) с РУ БРЕСТ-ОД-300⁶ и выполнить на ней расчётную проверку принятых проектных решений.

⁵ Что подтверждается заключёнными лицензионными договорами о предоставлении права использования программы для ЭВМ ЕВКЛИД/V1: 1) между ИБРАЭ РАН (Лицензиар) и АО «ГНЦ НИИАР» (Лицензиат) №1/2018-1/11276-Д, 2) между ИБРАЭ РАН (Лицензиар) и АО «НИКИЭТ» (Лицензиат) №2/2018-1/11276-Д.

⁶ Разрабатывается в Частном учреждении «ИТЦП «ПРОРЫВ».

Методология и методы исследования. Методология диссертационного исследования основывалась, главным образом, на математическом моделировании как методе исследования закономерностей процессов, протекающих в реакторных установках, а также системном подходе, требующем рассмотрения объекта исследования в логике его жизненного цикла. В частности, применялись следующие методы:

- анализ российских и международных требований к обоснованию безопасности реакторных установок;
- представление рассматриваемого объекта в терминах концептуальной физической модели, содержащей описание основных элементов и принципов их взаимодействия;
- теоретический анализ, обзор и обобщение современного состояния моделей теплогидравлических, нейтронно-физических и термомеханических процессов;
- идентификация и ранжирование массива моделируемых явлений и процессов;
- обзор современного состояния разработки интегральных программных комплексов для обоснования безопасности реакторных установок на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем;
- анализ и выбор алгоритмов и методов решения систем уравнений;
- расчётное обоснование параметров моделей;
- программная реализация моделей с использованием объектно-ориентированного подхода при проектировании и реализации компьютерного кода;
- повышение вычислительной эффективности алгоритмов за счёт использования алгоритмов параллельных вычислений, оценка эффективности алгоритмов параллельных вычислений;
- тестирование программного комплекса с использованием аналитических тестов;
- расчётное обоснование корректности программной реализации отдельных моделей и механизмов интеграции программных модулей в единый интегральный программный комплекс;
- обобщение и анализ экспериментальных данных, проведение верификационных расчётов, сравнение результатов расчётно-теоретического обоснования с экспериментальными данными;
- проведение многовариантных расчётов и статистический анализ результатов расчётов, оценка погрешностей расчётов отдельных параметров.

Положения, выносимые на защиту:

1. Интегральный программный комплекс ЕВКЛИД/V1, предназначенный для моделирования режимов нормальной эксплуатации и нарушений нормальной эксплуатации

реакторных установок на быстрых нейтронах с натриевым, свинцовым или свинцово-висмутовым теплоносителем с ТВЭлами с оксидным или нитридным топливом с газовым подслоем.

2. Система замыкающих соотношений для выполнения расчётов теплогидравлических процессов, протекающих в контурах РУ на быстрых нейтронах с натриевым, свинцовым или свинцово-висмутовым теплоносителем при нормальной эксплуатации и нарушениях нормальной эксплуатации.

3. Матрицы и результаты верификации отдельных программных модулей и интегрального программного комплекса ЕВКЛИД/V1 в целом для действующих и проектируемых реакторных установок с жидкометаллическим теплоносителем (натрий, свинец, свинец-висмут).

4. Методика оценки погрешностей результатов расчётов, получаемых по программным комплексам.

5. Методика интеграции программных модулей, отвечающих за моделирование отдельных физических процессов в составе интегрального программного комплекса.

6. Результаты расчётов отдельных важных для обоснования безопасности режимов нормальной эксплуатации и нарушений нормальной эксплуатации РУ БН-1200 и БРЕСТ-ОД-300 с использованием интегрального программного комплекса ЕВКЛИД/V1.

7. База данных по свойствам материалов и теплоносителей, используемых при расчётах по интегральному программному комплексу ЕВКЛИД/V1, включая оцененные данные по теплофизическим свойствам жидкого свинцового теплоносителя.

Степень достоверности результатов диссертационной работы подтверждается:

1. Применением научно обоснованных расчётных методик и физических моделей.

2. Результатами верификации интегрального программного комплекса ЕВКЛИД/V1 на данных экспериментов, выполненных как в России, так и за рубежом, включая отдельные режимы действующих блоков БН-600 и БН-800 с натриевым теплоносителем.

3. Результатами экспертизы верификационного отчёта интегрального программного комплекса ЕВКЛИД/V1 и его ТВЭльного модуля БЕРКУТ (рекомендован к аттестации на заседании Секции №4 Экспертного совета по аттестации программных средств при Ростехнадзоре 29 мая 2018 г.), выполненной ФБУ «НТЦ ЯРБ», и аттестационным паспортом теплогидравлического модуля HYDRA-IBRAE/LM/V1.1 (аттестационный паспорт программного средства №426 от 27 февраля 2018 г.).

4. Публикацией результатов в рецензируемых журналах и их представлением на ведущих российских и международных конференциях и семинарах, а также заседаниях Технического комитета проектного направления «Прорыв».

5. Публикацией полученных результатов в отчётах о научно-исследовательских и опытно-конструкторских работах, выпущенных в рамках проектного направления «Прорыв» и прошедших экспертизу ведущими специалистами отечественных предприятий атомной отрасли в области разработки и верификации расчётных кодов.

Апробация результатов. Результаты и материалы диссертационного исследования докладывались на:

- международных конференциях: третьей международной научно-практической конференции «Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики» (7–10 октября 2014 г., г. Москва, РФ), THINS 2014 International Workshop (20–22 января 2014 г., г. Модена, Италия), International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles: Safe Technologies and Sustainable Scenarios (FR13) (4–7 марта 2013 г., г. Париж, Франция), International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles: Next Generation Nuclear Systems for Sustainable Development (FR17) (26–29 июня 2017 г., г. Екатеринбург, РФ), 13-й Международной научно-практической конференции по атомной энергетике «Безопасность, эффективность, ресурс» (3–6 октября 2017 г., г. Севастополь, РФ);

- российских конференциях: Шестой Российской национальной конференции по теплообмену (27–31 октября 2014 г., г. Москва), научно-технической конференции Теплофизика–2013 «Теплофизика реакторов на быстрых нейтронах» (29 октября – 1 ноября 2013 г., г. Обнинск), научно-технической конференции Теплофизика–2014 «Теплофизика реакторов на быстрых нейтронах» (14–17 октября 2014 г., г. Обнинск), научно-технической конференции Теплофизика–2015 «Теплофизика реакторов на быстрых нейтронах» (6–9 октября 2015 г., г. Обнинск);

- семинарах: XXXIII Сибирском теплофизическом семинаре, посвящённом 60-летию Института теплофизики им.С.С.Кутателадзе СО РАН (6–8 июня 2017 г., г. Новосибирск), межотраслевом научно-техническом семинаре «Моделирование динамики ЯЭУ (разработка программных средств, верификация, оценка точности расчёта)» (5–7 июня 2018 г., г. Сосновый Бор), специализированных семинарах по проекту «Коды нового поколения» проектного направления «Прорыв» (28 ноября 2013 г., г. Москва; 16 октября 2014 г., г. Москва; 1 октября 2015 г., г. Москва; 27 октября 2016 г., г. Москва; 19 октября 2017 г., г. Москва);

- заседаниях экспертной группы по мультифизическим экспериментальным данным, бенчмаркам и валидации (Expert Group on Multi-Physics Experimental Data, Benchmarking and

Validation (EGMPEBV)) ОЭСР и координационных встречах по исследовательскому проекту МАГАТЭ «Выход активности из реактора, охлаждаемого натриевым теплоносителем, в случае тяжёлой аварии» (идентификационный номер проекта I32009-CR-1);

– секциях №1, №2 и №4 Совета по аттестации программных средств при Ростехнадзоре;

– I Школе-семинаре по обучению кодам нового поколения проектного направления «Прорыв» (27–29 ноября 2017 г., АНО ДПО «Техническая академия Росатома»).

Публикации. По теме диссертации её автором опубликовано 33 печатных работы, из них 15 – в ведущих реферируемых отечественных и зарубежном журналах из списка ВАК при Минобрнауки России («Атомная энергия», «Теплоэнергетика», «Вопросы атомной науки и техники», «Теплофизика высоких температур», «Annals of Nuclear Energy»); 18 – в материалах международных и российских конференций, семинаров, получено 3 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ (№2014619799, №2015660310, №2014619935), выпущено одно учебное пособие.

Личный вклад автора заключается в:

1. Научно-методическом руководстве, координации аналитических и научных исследований, сопряжённых с созданием интегрального программного комплекса.

2. Формулировке перечня теплогидравлических и нейтронно-физических процессов и явлений, которые должны моделироваться для адекватного описания режимов нормальной эксплуатации и нарушений нормальной эксплуатации проектируемых реакторных установок с тяжёлым жидкометаллическим теплоносителем.

3. Анализе и обосновании системы замыкающих соотношений для свинцового и свинцово-висмутового теплоносителей, доработке отдельных моделей для натриевого теплоносителя для канального теплогидравлического модуля интегрального программного комплекса, разработке модели трения о стенку двухфазного пароводяного теплоносителя.

4. Развитии методики интеграции отдельных модулей в состав интегральных программных комплексов и её программной реализации.

5. Под руководством и при непосредственном участии автора осуществлены:

5.1 программная реализация интегрального программного комплекса ЕВКЛИД/V1;

5.2 верификация отдельных программных модулей и интегрального программного комплекса ЕВКЛИД/V1 в целом;

5.3 анализ и оценка результатов верификационных расчётов, полученных с использованием интегрального программного комплекса ЕВКЛИД/V1, определение значений погрешностей расчётов отдельных параметров;

5.4 расчёты отдельных важных для обоснования безопасности режимов нормальной эксплуатации и нарушений нормальной эксплуатации РУ БН-1200 и БРЕСТ-ОД-300 и анализ полученных результатов.

6. Анализе и выборе наиболее надёжных данных по теплофизическим свойствам жидкого свинцового теплоносителя.

7. Программной реализации базы данных по свойствам материалов, необходимым для работы интегрального программного комплекса.

8. Разработке методики оценки погрешностей результатов расчётов, получаемых по программным комплексам.

Основная часть работ по созданию и верификации отдельных программных модулей и интегрального программного комплекса ЕВКЛИД/V1 была выполнена в Отделении разработки программного обеспечения для анализа безопасности АЭС ИБРАЭ РАН:

- твэльного модуля – в лаборатории №75 (и.о. заведующего лабораторией Болдырев А.В.);

- теплогидравлического модуля – в лаборатории №71 (и.о. заведующего лабораторией Алипченков В.М.) и в лаборатории расчётного моделирования реакторных установок (заведующий лабораторией Усов Э.В.);

- нейтронно-физического модуля – в лаборатории №74 (и.о. заведующего лабораторией Селезнев Е.Ф.);

- разработка средств пре- и постпроцессинга – в лаборатории №82 (заведующий лабораторией Исаков А.Б.);

- база данных по свойствам материалов и теплоносителей – в лаборатории №76 (заведующий лабораторией Вабищевич П.Н.);

- верификация – в лаборатории №81 (и.о. заведующего лабораторией Вепрев Д.П.).

Кроме того, на различных этапах разработки в создании моделей и верификации программного комплекса участвовали специалисты АО «ОКБМ Африкантов», АО «НИКИЭТ», АО «ГНЦ РФ-ФЭИ», НИЦ «Курчатовский институт», ОИВТ РАН.

Структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, семи разделов, заключения, списка сокращений и условных обозначений, словаря терминов и списка

литературы (284 наименования), списка иллюстративного материала. Диссертационная работа изложена на 333 страницах, содержит 69 таблиц и 91 рисунок.

Благодарности

Автор диссертационной работы благодарит научного руководителя ИБРАЭ РАН академика РАН Л.А.Большова за оказанную помощь при написании диссертационной работы и созданную в ИБРАЭ РАН творческую атмосферу, научного консультанта д.ф.-м.н. В.Ф.Стрижова за чуткое руководство, советы, консультации, уделённое время и поддержку автора диссертационной работы, к.ф.-м.н. В.М.Алипченкова, д.т.н. Ю.А.Зейгарника за конструктивные замечания и дискуссии по диссертационной работе, всех специалистов ИБРАЭ РАН, которые участвовали в разработке и верификации интегрального программного комплекса ЕВКЛИД/V1 и сделали написание диссертационной работы возможным.

Также автор выражает благодарность семье, которая терпеливо поддерживала её во время работы над диссертацией.

1 Основные характеристики интегрального программного комплекса ЕВКЛИД/V1

1.1 Вводные замечания к разделу 1

Раздел 1 диссертационной работы посвящен описанию назначения и функциональных возможностей интегрального программного комплекса ЕВКЛИД/V1.

При подготовке материалов данного раздела необходимо было обобщить и систематизировать накопленные данные по исследованию теплогидравлических процессов, протекающих в жидкометаллических теплоносителях, нейтронно-физических характеристик РУ на быстрых нейтронах, а также процессов распространения тепла в твэле, выхода продуктов деления из топливной таблетки и механических характеристик оболочек твэлов, полученные на экспериментальных стендах, а также на экспериментальных и энергетических реакторных установках. Следует отметить, что в силу определённых ограничений специалистами, выполнявшими эксперименты несколько десятилетий назад, не всегда описание экспериментальных установок, включая характеристики рабочих участков, результаты выполненных измерений были опубликованы в полном объёме или размерном виде, что потребовало проведения устных консультаций с выполнявшими их специалистами с целью восполнения недостающих данных. Также целый ряд основополагающих работ, представленных ведущими российскими и зарубежными экспертами на международных конференциях, к началу выполнения диссертационного исследования сохранился только на бумажных носителях в архивах отдельных специалистов. Для сохранения и наполнения базы знаний по РУ с жидкометаллическими теплоносителями соответствующие публикации были оцифрованы, оценены и классифицированы.

Представленные в данном разделе перечни процессов и явлений для реакторных установок на быстрых нейтронах с натриевым и тяжёлым жидкометаллическим теплоносителем являются результатом анализа и обобщения всех отобранных и признанных надёжными экспериментальных данных и опыта эксплуатации реакторных установок на быстрых нейтронах в России и за рубежом.

Отдельные положения данного раздела диссертационной работы опубликованы автором в [6], [26], [27], а также в верификационном отчёте интегрального программного комплекса ЕВКЛИД/V1 [28].

Непосредственно автором сформирован модульный состав интегрального программного комплекса, сформулированы перечни ключевых процессов и явлений для реакторных установок с тяжёлым жидкометаллическим теплоносителем.

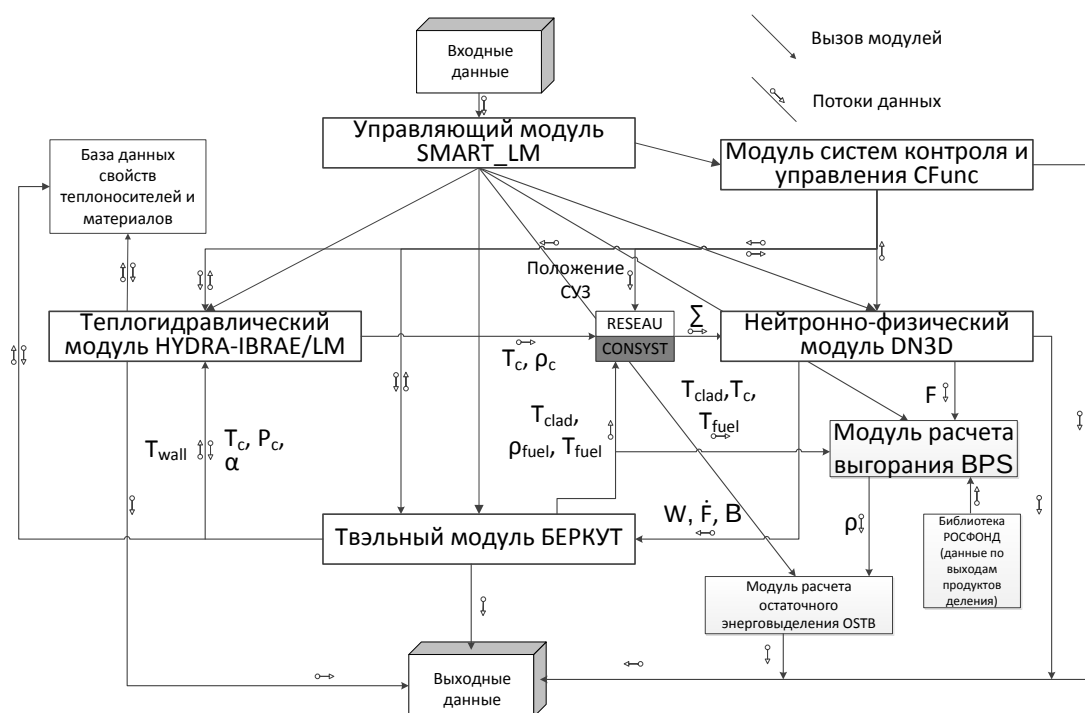
1.2 Общая информация

Основные подходы к разработке интегральных программных комплексов для анализа безопасности АЭС были разработаны в ИБРАЭ РАН в период 1990–начала 2000-х гг. По мере накопления методического аппарата происходил переход к практической реализации. Первым разработанным в ИБРАЭ РАН совместно с ОАО «АТОМПРОЕКТ» и ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» интегральным программным комплексом стал СОКРАТ/V1. Опыт его создания лёг в основу при разработке интегрального программного комплекса ЕВКЛИД/V1, по которому к 2012 г. была завершена постановочная и подготовительная часть работы.

Интегральный программный комплекс ЕВКЛИД/V1 разработан в рамках проекта «Коды нового поколения» проектного направления «Прорыв» за счёт средств Федеральной целевой программы «Ядерные энерготехнологии нового поколения на период 2010 – 2015 годов и на перспективу до 2020 года» [6], [26 – 31]. За период с 2012 по 2017 гг. было выпущено два официальных релиза первой версии программного комплекса ЕВКЛИД/V1, отличающихся степенью проработанности пользовательских характеристик, наличием ряда усовершенствованных моделей, реализованных в виде соответствующих программных модулей, включённых в состав интегрального программного комплекса (например, [32]). В диссертационной работе речь идёт о втором релизе.

В состав интегрального расчётного кода ЕВКЛИД/V1 входят следующие базовые программные модули (смотреть рисунок 1.1), взаимодействие между которыми реализовано с использованием интегрирующей оболочки SMART_LM:

1. теплогидравлический – HYDRA-IBRAE/LM/V1.1;
2. нейтронно-физический – DN3D (с кинетической опцией на базе кода CORNER);
3. твэльный – БЕРКУТ;
4. расчёта выгорания топлива – BPS;
5. расчёта остаточного энерговыделения – OSTB.



T_{wall} – температура поверхности оболочки твэла; T_c – температура теплоносителя; T_{clad} – средняя по объёму температура оболочки твэла; T_{fuel} – температура топлива; ρ_{fuel} – плотность топлива; ρ_c – плотность теплоносителя; α – коэффициент теплоотдачи; P_c – давление теплоносителя; $\dot{F}$ – повреждающая доза; W – линейная мощность энерговыделения; B – выгорание; F – плотность потока нейтронов; ρ – ядерные концентрации нуклидов топлива и продуктов деления; Σ – нейтронные сечения

Рисунок 1.1 – Структура интегрального кода ЕВКЛИД/V1

Каждый из указанных выше программных модулей отвечает за моделирование определённой группы физических процессов. Кроме того, в состав интегрального программного комплекса входят, так называемые, сервисные программные модули:

1. Программный модуль, представляющий собой базу данных по свойствам материалов и теплоносителей, включая функции, которые необходимы для получения соответствующих параметров в программном комплексе.
2. Модуль CFunc, который позволяет определять функции от рассчитываемых программными модулями переменных. Таким образом, можно задавать работу системы контроля и управления (СКУ) реакторной установки.
3. Модуль подготовки констант для выполнения нейтронно-физических расчётов CONSYST/RF (разработчиком и правообладателем данного модуля является АО «ГНЦ РФ-ФЭИ». На рисунке 1.1 он выделен серой заливкой).

4. Модуль RESEAU, реализующий процедуру восстановления констант для нейтронно-физического расчёта из их аналитических зависимостей.

Структура интегрального программного комплекса ЕВКЛИД/V1, включая данные, которыми обмениваются между собой отдельные программные модули в процессе расчёта, представлена на рисунке 1.1. Обмен данными между программными модулями, показанными на рисунке 1.1, осуществляется в конце каждого расчётного шага.

1.3 Объекты моделирования

Объектами моделирования интегральным программным комплексом являются действующие и проектируемые РУ с натриевым теплоносителем и проектируемые РУ со свинцовым или свинцово-висмутовым теплоносителем [28].

1.4 Назначение

Интегральный программный комплекс ЕВКЛИД/V1 предназначен для численного моделирования режимов нормальной эксплуатации и нарушений нормальной эксплуатации реакторных установок на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем (натрий, свинец или свинец-висмут), исключая внешние воздействия на ОИАЭ и горение натрия в помещениях энергоблока при течах трубопроводов и оборудования второго контура, процессы разрушения или плавления элементов активной зоны, включая ТВЭЛы, физико-химические процессы в тяжёлом жидкометаллическом теплоносителе.

Интегральный программный комплекс должен моделировать следующие режимы действующих и проектируемых РУ с натриевым теплоносителем и проектируемых РУ со свинцовым или свинцово-висмутовым теплоносителем:

- режимы нормальной эксплуатации:
 - 1) пуск реактора и выход на стационарный режим;
 - 2) работа на энергетическом уровне мощности, в том числе режимы работы на частичных уровнях мощности;
 - 3) плановый останов энергоблока после работы на заданном уровне мощности;
 - 4) режимы работы РУ с неполным количеством петель циркуляции теплоносителя;
 - 5) режимы остановленного реактора;
- режимы нарушений нормальной эксплуатации проектируемых РУ с тяжёлым жидкометаллическим теплоносителем:

1) несанкционированное введение положительной реактивности (непредусмотренный вывод из активной зоны группы РО АР на различных уровнях мощности РУ, вынос в активную зону в составе теплоносителя газовых или паровых пузырей вследствие разгерметизации твэлов или труб ПГ и др.);

2) нарушение теплоотвода от активной зоны вследствие отказов оборудования или ошибок оператора (блокировка расхода теплоносителя через ТВС; нарушение работы ГЦН, в том числе при потере питания; отказы оборудования и трубопроводов каналов нормального расхолаживания или аварийного охлаждения, влияющие на отвод остаточного тепла; повышенный теплоотвод через систему воздушного охлаждения);

3) изменение давления в первом контуре (разгерметизация газовой полости РУ);

4) ухудшение отвода тепла вторым контуром (нарушение работы питательных насосов второго контура; ложное срабатывание отсечных клапанов питательной воды на входе ПГ и другие);

5) избыточный отвод тепла вторым контуром (ложное срабатывание аварийной защиты при работе на номинальной мощности; нарушение режима работы ПГ);

6) изменение давления во втором контуре;

– режимы нарушений нормальной эксплуатации действующих и проектируемых РУ с натриевым теплоносителем:

1) несанкционированное введение положительной или отрицательной реактивности с нормальным срабатыванием аварийной защиты;

2) потеря охлаждения активной зоны вследствие отказов оборудования или ошибок оператора с нормальным срабатыванием аварийной защиты;

3) потеря охлаждения активной зоны вследствие частичной блокировки проходного сечения с нормальным срабатыванием аварийной защиты;

4) нарушения в системе теплоотвода по промежуточному и третьему контурам вследствие отказов оборудования или ошибок оператора с нормальным срабатыванием аварийной защиты;

5) разуплотнение газовой системы первого контура;

6) нарушения в системе теплоотвода по промежуточному и третьему контурам вследствие отказов оборудования или ошибок оператора с нормальным срабатыванием аварийной защиты;

7) частичное перекрытие проходного сечения одной ТВС за счёт распухания конструкционных материалов, попадания примесей теплоносителя или посторонних предметов.

Интегральный программный комплекс ЕВКЛИД/V1 должен моделировать следующее оборудование и системы реакторных установок на быстрых нейтронах: активную зону (геометрия ТВС – гексагональная в плане), воздушные теплообменники, промежуточные теплообменники, парогенератор, раздаточные и сборные коллекторы (верхнюю камеру смешения и напорный коллектор), аварийные теплообменники, трубопроводы, газовый объём, насосы и клапаны, систему контроля и управления (путём задания управляющих сигналов через файл ввода входных данных).

1.5 Функциональность, перечень определяющих процессов и явлений

Исходя из назначения интегрального программного комплекса ЕВКЛИД/V1, его функциональность должна позволять моделировать:

- теплогидравлические процессы, протекающие в различных типах теплоносителей (натрий, свинец, свинец-висмут, вода, воздух), включая процессы, протекающие при межконтурных течах парогенератора РУ с натриевым или тяжёлым жидкометаллическим теплоносителем, в канальном приближении;
- процессы, протекающие в твэлах с оксидным или нитридным топливом и газовым подслоем: распространение тепла, эволюцию напряженно-деформированного состояния топлива и оболочки, выход продуктов деления (ПД) в свободный объём под оболочку твэла при облучении топлива, наработку ПД, перенос ПД внутри топлива и выход в открытую пористость, взаимодействие ПД внутри топливных зерен с точечными и протяженными дефектами кристаллической решетки и другие;
- нейтронно-физические процессы, включая расчёт мощности реактора в зависимости от времени, выгорания и остаточного энерговыделения.

Соответствующее требование определило модульный состав интегрального программного комплекса, представленный в подразделе 1.2 данной работы.

Перечень определяющих процессов и явлений для РУ на быстрых нейтронах с тяжёлым жидкометаллическим теплоносителем

При нормальной эксплуатации в первом контуре РУ реализуется однофазное течение тяжёлого жидкометаллического теплоносителя.

Определяющими явлениями в режимах нормальной эксплуатации являются (по пароводяному контуру здесь и ниже рассматриваются процессы в пределах парогенератора):

- гидравлическое сопротивление тяжёлого жидкого металла (ТЖМ) в обогреваемых и необогреваемых каналах простой формы;

- гидравлическое сопротивление ТЖМ в обогреваемых и необогреваемых пучках (треугольная упаковка), в том числе, при наличии дистанционирующей решётки;
- гидравлическое сопротивление при обтекании змеевиковых пучков;
- гидравлическое сопротивление двухфазных пароводяных потоков;
- радиальная и осевая теплопроводность в твэле и конструкциях;
- теплообмен ТЖМ в каналах простой формы;
- теплообмен при обтекании ТЖМ змеевиков;
- теплообмен ТЖМ в пучках гладких твэлов, в том числе при наличии дистанционирующей решетки (треугольная упаковка);
- теплообмен к пароводяной смеси в различных зонах прямоточного змеевикового ПГ;
- лучистый теплообмен со свободной поверхности ТЖМ;
- теплоотдача к воздуху в теплообменнике САОР;
- теплообмен в теплоизолирующем зазоре опускного участка ПГ;
- изменения уровней теплоносителя в газовом объёме, УПОС и др. элементах;
- естественная и вынужденная конвекция теплоносителя в больших полостях;
- изменение геометрии тракта течения теплоносителя в результате процессов коррозии и отложения её продуктов, а также формоизменения твэлов;
- изменение давления и состава газа под оболочкой твэла из-за выхода ГПД;
- зависимость свойств материалов твэла от температуры, выгорания и радиационной поврежденности;
- доспекание/распухание топливной композиции;
- распухание оболочки;
- механическое взаимодействие топлива и оболочки при исчезновении зазора;
- размножение нейтронов;
- трёхмерное распределение энергосвечения, включая остаточное энергосвечение;
- изменение локального спектра нейтронов при образовании полостей и утечки при изменении уровня теплоносителя в устройствах пассивной обратной связи.

При межконтурных течах парогенератора необходимо правильно рассчитывать параметры истекающей пароводяной смеси (расход, энтальпия) и движение паровых образований в потоке ТЖМТ (межфазное трение и теплообмен), то есть к перечню определяющих явлений добавляются:

- истечение пароводяной смеси в поток ТЖМ, включая спектр размеров пароводяных образований;
- движение паровых образований в потоке ТЖМ;
- импульс давления и его распространение по контуру РУ при образовании межконтурной течи парогенератора;
- теплообмен в присутствии пароводяной смеси в теплоносителе первого контура.

Перечень определяющих процессов и явлений для РУ на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем

В режимах нормальной эксплуатации в первом и втором контурах РУ двухфазные режимы течения теплоносителя не реализуются. Номинальный режим работы реактора подразумевает постоянство тепловыделения в а.з. и постоянство расхода теплоносителя. При останове и пуске реактора имеют место изменение расхода теплоносителя и тепловых потоков, которые, однако, также не сопровождаются процессами кипения теплоносителя.

Определяющими явлениями для реакторной установки в режимах нормальной эксплуатации являются (по пароводяному контуру здесь и ниже рассматриваются процессы в пределах парогенератора):

- гидравлические потери давления на трение/местных сопротивлениях в основных участках контура циркуляции теплоносителя (однофазный режим);
- изменение параметров газовой полости компенсационного объёма;
- теплообмен теплоносителя в основных участках контура циркуляции в однофазном режиме;
- теплообмен излучением;
- сложный теплообмен (конвекция плюс излучение);
- радиальная/осевая теплопроводность в твэле;
- принудительная и естественная циркуляция теплоносителя в контурах РУ;
- изменения уровней теплоносителя в баке реактора;
- перенос неконденсируемых газов;
- теплообмен в основном оборудовании РУ (а.з., ПТО, ПГ);
- теплообмен натрия с воздухом в системах аварийного отвода тепла;
- тепловые потери с оборудования первого и второго контуров;
- изменение давления и состава газа под оболочкой твэла из-за выхода ГПД;
- зависимость свойств материалов твэла от температуры, выгорания и радиационной поврежденности;

- доспекание/распухание топливной композиции;
- распухание оболочки;
- механическое взаимодействие топлива и оболочки при исчезновении зазора;
- размножение нейтронов;
- трёхмерное распределение энерговыделения, включая остаточное энерговыделение.

Если рассматривать режимы нарушений нормальной эксплуатации, то, например, останов одного ГЦН первого контура вызывает падение расхода через одну из петель РУ. Это вызывает неравномерный подогрев теплоносителя в активной зоне (а.з.), неравномерный профиль скоростей и температур в верхней камере смешения и на входе в ПТО, а значит, и различные подогревы теплоносителя в петлях второго и третьего контуров. При незапланированном подъёме стержня РС происходит неравномерный рост тепловыделения по радиусу а.з. Определяющим явлением в данном случае является теплообмен в условиях изменения теплового потока, вызванного эффектами реактивности. При нарушении теплоотвода из-за нарушения подачи питательной воды или разрыва парового коллектора, возможен перегрев теплоносителя и как следствие его закипание. Течь воды в натрий в ПГ сопровождается протеканием интенсивной химической реакции с температурой в зоне реакции 1300–1400⁰С и выделением газообразного водорода, скорость переноса которого по контуру определяет время обнаружения течи имеющимися в РУ системами контроля.

Таким образом, определяющими явлениями для корректного расчёта характеристик РУ в режимах нарушений нормальной эксплуатации являются:

- гидравлические потери давления на трение/местных сопротивлениях в основных участках контура циркуляции теплоносителя (однофазный режим);
- гидравлические потери давления на трение/местных сопротивлениях в основных участках контура циркуляции теплоносителя (двухфазный режим);
- изменение параметров газовой полости компенсационного объёма;
- теплообмен теплоносителя в основных участках контура циркуляции в однофазном режиме;
- теплообмен теплоносителя в основных участках контура циркуляции в двухфазном режиме;
- аксиальная теплопроводность натриевого теплоносителя;
- кипение натриевого теплоносителя;
- конденсация натриевого теплоносителя;

- сложный теплообмен (конвекция + излучение);
- гидравлическая неустойчивость в а.з.;
- кризис теплообмена;
- гидравлическая неустойчивость в системе параллельных каналов с водяным теплоносителем;
- радиальная/осевая теплопроводность в твэле;
- принудительная и естественная циркуляция теплоносителя в контурах РУ;
- гидравлические процессы с размыканием контура циркуляции;
- изменения уровней теплоносителя в баке реактора;
- теплообмен в основном оборудовании РУ (а.з., ПТО, ПГ);
- теплообмен натрия с воздухом в системах аварийного отвода тепла;
- тепловые потери реактора, трубопроводов и оборудования второго контура;
- выделение водорода и тепла при химическом взаимодействии натрия с водой;
- растворение водорода в натрии;
- распространение возмущений давления в теплоносителе;
- изменение локального спектра нейтронов при образовании полостей;
- зависимость свойств материалов твэла от температуры, выгорания и радиационной поврежденности;
- доспекание/распухание топливной композиции;
- распухание оболочки;
- механическое взаимодействие топлива и оболочки при исчезновении зазора;
- размножение нейтронов;
- трёхмерное распределение энерговыделения, включая остаточное энерговыделение.

Исходя из перечня процессов и явлений, которые должны моделироваться интегральным программным комплексом, были разработаны модели, описанные в разделе 2 данной диссертационной работы.

1.6 Заключительные и обобщающие замечания по разделу 1

В разделе 1 представлена общая информация об интегральном программном комплексе ЕВКЛИД/V1. Его назначением является численное моделирование режимов нормальной эксплуатации и нарушений нормальной эксплуатации реакторных установок на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем (натрий, свинец или свинец-висмут), исключая внешние воздействия на объекты использования атомной энергии и горение натрия в

помещениях энергоблока при течах трубопроводов и оборудования второго контура, процессы разрушения или плавления элементов активной зоны, физико-химические процессы в тяжёлом жидкометаллическом теплоносителе.

На основе обобщения, систематизации и анализа экспериментальных данных и опыта, накопленного при работе реакторных установок с жидкометаллическим теплоносителем, сформированы перечни определяющих процессов и явлений, которые должны моделироваться интегральным программным комплексом для корректного расчёта режимов нормальной эксплуатации и нарушений нормальной эксплуатации реакторных установок на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем.

Сформирован модульный состав интегрального программного комплекса: теплогидравлический модуль (HYDRA-IBRAE/LM/V1.1), нейтронно-физический модуль (DN3D), твэльный модуль (БЕРКУТ), модуль расчёта выгорания топлива (BPS) и остаточного энерговыделения (OSTB).

2 Модели теплогидравлических, нейтронно-физических и термомеханических процессов в интегральном программном комплексе ЕВКЛИД/V1

2.1 Вводные замечания к разделу 2

В разделе 2 приведено описание физико-математических моделей каждого из модулей интегрального программного комплекса ЕВКЛИД/V1.

Разработка моделей интегрального программного комплекса ЕВКЛИД/V1 базировалась на результатах научных исследований (как теоретических, так и экспериментальных), полученных в России и за рубежом начиная с 50-х годов XX-го века.

Модели теплогидравлического модуля основаны на хорошо зарекомендовавшем себя на практике канальном приближении. Под канальным понимается подход, при котором рассматриваемая расчётная область разбивается на расчётные ячейки (каналы) и предполагается, что изменением характеристик потока в поперечном направлении можно пренебречь. Несмотря на бурное развитие вычислительной техники и расчётных кодов CFD класса, канальный подход широко используется во всем мире для моделирования динамических режимов, поскольку позволяет при приемлемых временных затратах получать робастный результат, а также описывать процессы теплообмена в двухфазном теплоносителе (возможности CFD кодов для описания двухфазных процессов до сих пор ограничены). При этом разработаны специальные приемы для обеспечения возможности учёта существенно неоднородных эффектов, например, за счёт задания поперечных связей между каналами. Канальный подход базируется на построении так называемых карт режимов течения и теплообмена и замыкающих соотношениях, описывающих межфазные взаимодействия и взаимодействия фаз со стенками канала, которые строятся, главным образом, на основе анализа и обобщения экспериментальных данных. В нашем случае, построение надёжных моделей канального модуля для жидкометаллических теплоносителей потребовало обобщения и детального анализа имеющихся экспериментальных данных и замыкающих зависимостей, реализованных в отечественных и зарубежных расчётных кодах (SIMMER, KOPCAR, RELAP5-3D, TRAC и других). При этом простое заимствование каких-либо зависимостей без детального анализа было невозможно, поскольку необходимо было оценить, на базе обобщения каких именно экспериментальных данных они получены, насколько применимы для описания режимов нормальной эксплуатации и нарушений нормальной эксплуатации реакторных установок, разрешить имеющиеся противоречия в публикациях, подобрать наиболее

удовлетворяющую целевой функции зависимость. Результаты соответствующей работы приведены в данном разделе.

При разработке моделей, описывающих физико-химические, термомеханические процессы и процессы распространения тепла в твэле, за основу были взяты модели расчётного кода SFPR (Single Fuel Rod Performance) [33], предназначенного для моделирования поведения твэлов с UO_2 топливом реакторных установок с водой под давлением в режимах нормальной эксплуатации и при её нарушениях. Топливный модуль кода SFPR – MFPR (Module for Fission Products Release), разработанный в ИБРАЭ РАН совместно с IRSN (Франция), до сих пор является одним из наиболее продвинутых в мире с точки зрения детального моделирования поведения топлива. Не случайно именно этот модуль выбран для интеграции в широко используемый во всем мире твэльный код TRANSURANUS [34]. Однако взятые за базу модели были существенно доработаны или переработаны в соответствии с особенностями процессов, протекающих в твэлах реакторов на быстрых нейтронах. Кроме того, рассмотрение новых типов топлива – нитридного и МОКС – потребовало пересмотра и дополнения моделей наработки, взаимопревращений и переноса радиоактивных продуктов деления в топливе, разработки новых термохимических моделей, определения микроскопических параметров отдельных моделей на основе молекулярно-динамических расчётов, формирования требований к постановке специальных ампульных экспериментов и настройки микроскопических параметров на результатах измерений интегральных параметров твэлов, облученных в составе экспериментальных сборок в РУ БН-600.

Что касается разработки моделей нейтронно-физических процессов, то к моменту начала разработки моделей интегрального программного комплекса ЕВКЛИД/V1 существовали аттестованные расчётные коды, по которым можно было проводить расчёты реакторных установок на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем. Это коды TRIGEX (АО «ГНЦ РФ-ФЭИ»), JARFR (НИЦ «Курчатовский институт»), ГЕФЕСТ (АО «ВНИИАЭС»), DORT (ORNL), TORT (ORNL) и другие. Задача исследования заключалась в том, чтобы обобщить различные подходы и описать особенности различных типов РУ – не только с натриевым, но и свинцовым и свинцово-висмутовым теплоносителем.

В следующих подразделах представлены итоги этих разработок. Детальное изложение замыкающих зависимостей приведено для целостности представления материала и обеспечения возможности использования диссертационной работы при решении инженерных задач.

По результатам разработки отдельных моделей теплогидравлического модуля для натриевого теплоносителя защищена кандидатская диссертация Э.В.Усова (Новосибирский

филиал ИБРАЭ РАН) «Моделирование процессов кипения в потоке натрия в двухжидкостном канальном приближении в задачах обоснования безопасности ядерных энергетических установок».

По результатам разработки кинетической опции нейтронно-физического модуля DN3D, получившей название CORNER, защищена кандидатская диссертация В.П.Березнева (ИБРАЭ РАН) «Разработка нейтронно-физического кода CORNER для анализа стационарных и нестационарных процессов в реакторах на быстрых нейтронах».

По результатам разработки моделей твэльного модуля БЕРКУТ для нитридного топлива защищена кандидатская диссертация А.П.Долгодворова (ИБРАЭ РАН) «Моделирование поведения продуктов деления в нитридном топливе».

Представленные в данном разделе диссертационной работы материалы опубликованы автором в соавторстве с другими участниками работ в статьях [6], [35–40], а также в отчётах [41, 42].

Непосредственно автором диссертационной работы проведён анализ, обобщение и отбор системы замыкающих соотношений для тяжёлых жидкометаллических теплоносителей, доработаны отдельные модели для натриевого теплоносителя для канального теплогидравлического модуля интегрального программного комплекса ЕВКЛИД/V1, разработана модель трения о стенку двухфазного пароводяного теплоносителя.

2.2 Моделирование теплогидравлических процессов в контурах и активной зоне реакторных установок на быстрых нейтронах с натриевым, свинцовым или свинцово-висмутовым теплоносителем

Основная система уравнений теплогидравлики

Объектом моделирования являются контуры реакторных установок на быстрых нейтронах с натриевым, свинцовым или свинцово-висмутовым теплоносителем, включая водяной и воздушный контуры.

Основными рассчитываемыми теплогидравлическим модулем параметрами являются поля скоростей, температуры, давления теплоносителя и рабочего тела, а также значения паросодержания (газосодержания) в расчётных ячейках, на которые разбивается моделируемая область.

При моделировании обеспечивается расчёт следующих процессов:

- тепломассообмена в контурах со следующими сочетаниями теплоносителя и

рабочего тела: тяжёлый жидкометаллический теплоноситель – вода, натрий – вода;

- кипения натриевого теплоносителя;
- течений с включениями газовой фазы;
- тепломассообмена при попадании пароводяной смеси в тяжёлый жидкометаллический теплоноситель;
- тепломассообмена в газовых полостях, заполненных инертным газом (аргоном), и в воздушных системах нормального и аварийного расхолаживания реактора.

Приведённые в данном пункте соотношения опубликованы автором диссертационной работы в [6], [39] и в верификационных отчётах [28, 41].

Течение двухфазной среды (пар, жидкость) с примесью неконденсируемых газов в теплогидравлическом модуле интегрального кода ЕВКЛИД/V1 описывается в двухжидкостном приближении [35]. Предполагается, что:

- газовая фаза состоит из пара и/или неконденсируемых газов;
- давления жидкой и газовой фазы равны;
- неконденсируемые газы имеют одинаковую температуру и скорость с паровой фазой теплоносителя;
- неконденсируемые газы удовлетворяют уравнению состояния идеального газа;
- газовая фаза удовлетворяет закону Дальтона.

При этом используется подход, предложенный авторами расчётного кода КОРСАР [43], в котором в дисперсно-кольцевом режиме отдельно учитывается влияние плёнки жидкости и взвешенных в газовом ядре капель на характеристики потока. В этих предположениях течение смеси теплоносителя с неконденсируемыми газами описывается следующей системой уравнений, записанной в форме, аналогичной используемой в коде КОРСАР [43], за исключением дополнительного для жидкометаллических теплоносителей члена, отвечающего за поток тепла за счёт продольной теплопроводности.

Уравнения сохранения массы фаз:

$$\frac{\partial}{\partial t}(A\varphi_g\rho_g) + \frac{\partial}{\partial z}(A\varphi_g\rho_g v_g) = A\Gamma_v + A\sum_{n=1}^{N_n} S_n + AS_v, \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(A\varphi_f\rho_f) + \frac{\partial}{\partial z}(A(1-E_{dv})\varphi_f\rho_f v_f) + \frac{\partial}{\partial z}(A \cdot E_{dv}\varphi_f\rho_f v_g) = A\Gamma_f + AS_f \quad (2.2)$$

где φ_k – объёмная концентрация фазы k ; ρ_k – плотность фазы k , кг/м³; A – площадь проходного сечения канала, м², v_k – скорость фазы k , м/с; z – координата вдоль канала, м; N_n – количество неконденсируемых газов; Γ_k – интенсивность массообмена фазы k на межфазной границе,

кг/м³/с; S_v , S_n , S_f – интенсивности образования пара, n-го неконденсируемого газа и жидкости вследствие поступления из внешнего источника (стока) соответственно; E_{dv} – объёмная доля капель в жидкой фазе; k – идентификатор фазы (f, g).

Уравнение сохранения количества движения газа (газокапельного ядра):

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(A\varphi_c\rho_c v_g)}{\partial t} + \frac{\partial(A\varphi_c\rho_c v_g v_g)}{\partial z} + A\varphi_c \frac{\partial}{\partial z} P = \\ & = A \left(\Gamma_v v_i - \tau_{ig} - \tau_{wg} - \varphi_c \rho_c g \cdot \sin \vartheta - v_g S_D + v_f S_E + F_m + F_{st} + I_{ge} + \varphi_c H_{\text{pump}} \right), \end{aligned} \quad (2.3)$$

где дополнительно к использующимся ранее обозначениям введены следующие: P – давление, Па; S_D , S_E – удельные интенсивности осаждения и срыва капель в дисперсно-кольцевом режиме; I_{ge} – импульс, вносимый внешними источниками неконденсируемых газов и пара; ϑ – угол наклона канала к горизонтали; H_{pump} – напор насоса, Па/м; τ_{ik} – сила трения между фазами на межфазной границе, отнесенная на единицу объёма, Н/м³; τ_{wk} – сила трения на единицу объёма между фазой и стенкой канала, Н/м³; φ_c – объёмная доля газокапельного ядра, ρ_c – плотность газокапельного ядра, F_{st} – сила, отличная от нуля только для расслоенного течения в горизонтальных каналах, определены в работе [43]; F_m – сила присоединённой массы [43], [44].

Уравнение сохранения количества движения жидкости (жидкой плёнки):

$$\begin{aligned} & \frac{\partial[A(1-\varphi_c)\rho_f v_f]}{\partial t} + \frac{\partial[A(1-\varphi_c)\rho_f v_f v_f]}{\partial z} + A(1-\varphi_c) \frac{\partial}{\partial z} P = \\ & = A \left(\Gamma_f v_i + \tau_{if} - \tau_{wf} - (1-\varphi_c)\rho_f g \cdot \sin \vartheta + v_g S_D - v_f S_E - F_m - F_{st} + I_{fe} + (1-\varphi_c) H_{\text{pump}} \right), \end{aligned} \quad (2.4)$$

Скорости фаз на межфазной поверхности определяются по следующему соотношению:

$$v_i = \begin{cases} v_f, & \Gamma_v > 0, \\ v_g, & \Gamma_v < 0; \end{cases} \quad (2.5)$$

то есть полагается, что образовавшийся пар обладает скоростью жидкой фазы, а сконденсированная жидкость – скоростью газовой фазы.

Уравнения сохранения энергии фаз:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(A\varphi_g\rho_g h_g)}{\partial t} + \frac{\partial(A\varphi_g\rho_g h_g v_g)}{\partial z} - A\varphi_g \frac{dP}{dt} = \\ & = A \left(\Gamma_v h_{ig} + Q_{g,diss} + Q_{ig} + Q_{wg} + Q_g - Q_{gf} + \sum_{n=1}^{N_n} S_n h_{*n} + S_v h_{*v} \right), \end{aligned} \quad (2.6)$$

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial(A \varphi_f \rho_f h_f)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} ((1 - E_{dv}) A \varphi_f \rho_f h_f v_f) + \frac{\partial}{\partial z} (E_{dv} A \varphi_f \rho_f h_f v_g) - \\
& - \varphi_f \left(\frac{\partial P}{\partial t} + ((1 - E_{dv}) v_f + E_{dv} v_g) \frac{\partial P}{\partial z} \right) = A \left(-\Gamma_v h_{if} + Q_{f,diss} + Q_{if} + Q_{wf} + \right. \\
& \left. + Q_f + Q_{gf} + S_f h_{*f} + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial z} \left(A \varphi_f \lambda_f \frac{\partial T_f}{\partial z} \right) \right),
\end{aligned} \tag{2.7}$$

где h_{*k} , h_{*n} – удельная энтальпия «источника/стока» фазы k или неконденсируемых газов n соответственно, Дж/кг; λ_f – теплопроводность жидкой фазы, Вт/(м К); T_f – температура жидкой фазы, К.

В (2.6)–(2.7) Q_{ig} , Q_{if} , Q_{gf} , как в [45], определяются следующим образом:

$$Q_{ig} = \frac{P_v}{P} a_i \alpha_{ig} (T_s - T_g), \tag{2.8}$$

$$Q_{if} = a_i \alpha_{if} (T_s - T_f), \tag{2.9}$$

$$Q_{gf} = \frac{P - P_v}{P} a_i \alpha_{gf} (T_g - T_f). \tag{2.10}$$

где a_i – плотность площади межфазной поверхности, м²/м³; T_g – температура газовой фазы, К; T_s – температура насыщения, К; α_{gf} – коэффициент теплоотдачи от газовой к жидкой фазе, Вт/(м² К); α_{ik} – коэффициент теплоотдачи от фазы k к межфазной поверхности, Вт/(м² К).

В случае отсутствия неконденсируемых газов Q_{gf} обращается в ноль.

Последний член в (2.7) представляет собой поток тепла за счёт продольной теплопроводности и используется только для жидкометаллических теплоносителей. В (2.6) и (2.7) $Q_{g,diss}$, $Q_{f,diss}$ – тепловыделение за счёт диссипации. Q_{wk} состоит из двух частей. Одна расходуется на конвективный теплообмен с фазой, другая – на генерацию пара (Q_{wki}). В случае кипения насыщенной жидкости весь тепловой поток от стенки идёт на парообразование. При кипении недогретой жидкости часть теплового потока идет на парообразование, а другая – на увеличение энтальпии жидкости.

Для сохранения баланса энергии и массы фаз необходимо выполнение условий [45]:

$$\begin{aligned}
& \Gamma_v + \Gamma_f = 0, \\
& Q_{ig} + Q_{if} + \Gamma_v (h_{ig} - h_{if}) + Q_{wfi} + Q_{wgi} = 0.
\end{aligned} \tag{2.11}$$

Здесь Γ_v – интенсивность массообмена, а h_{ig} , h_{if} определяются как:

$$h_{ig} = \frac{1}{2} \left[(h_{gs} + h_g) + \eta (h_{gs} - h_g) \right], \quad h_{if} = \frac{1}{2} \left[(h_{fs} + h_f) - \eta (h_{fs} - h_f) \right],$$

$$\eta = \begin{cases} 1, & \text{при } \Gamma_v \geq 0 \\ -1 & \text{при } \Gamma_v < 0 \end{cases},$$

где h_{gs}, h_{fs} – удельные энтальпии фаз на линии насыщения.

Для натриевого теплоносителя члены Q_{wfi} и Q_{wgi} уравнения (2.11) равны нулю:

Уравнения неразрывности неконденсируемых газов:

$$\frac{\partial}{\partial t} (A \varphi_g \rho_g X_n) + \frac{\partial}{\partial z} (A \varphi_g \rho_g X_n v_g) = A S_n. \quad (2.12)$$

Предполагается, что неконденсируемый газ поступает в газовую фазу со скоростью газовой фазы.

Для замыкания системы уравнений (2.1)–(2.12) записываются следующие соотношения:

$$\rho_f = \rho_f(P, h_f), \quad \rho_g = \rho_g(P, h_g, X_{1,..., X_{N_n}}), \quad (2.13)$$

$$\varphi_g + \varphi_f = 1. \quad (2.14)$$

В (2.13) используется допущение, что плотность жидкости не зависит от массовых концентраций неконденсируемых газов.

В двухжидкостных моделях теплогидравлики одним из ключевых вопросов является выбор и обоснование используемых карт режимов течения и теплообмена, а также блока замыкающих соотношений, описывающих трение двухфазного потока о стенку, межфазное трение, теплообмен со стенкой, интенсивность межфазного теплообмена.

Необходимо отметить, что основное отличие жидких металлов от воды заключается в высокой теплопроводности жидкой фазы и, как следствие, малости числа Прандтля. Таким образом, различия в поведении жидких металлов и воды должны проявляться при наличии явлений, сопровождающихся передачей тепла. Описание гидродинамических процессов в жидком металле должно быть близко к описанию процессов в водяном теплоносителе. По этой причине при выборе гидравлических замыкающих соотношений было принято решение руководствоваться соотношениями, полученными для воды и записанными с использованием безразмерных комплексов.

Карты режимов течения и замыкающие соотношения для натриевого теплоносителя

Поскольку используемая в теплогидравлическом модуле интегрального программного комплекса ЕВКЛИД/V1 карта режимов течения для натриевого теплоносителя приведена в статье [36] и отчёте [41], а замыкающие соотношения, используемые для натриевого теплоносителя, опубликованы в работах [35–37, 41, 46–47], то в данной диссертационной работе отметим лишь ряд ключевых особенностей моделей, используемых для описания процессов, протекающих в натриевом теплоносителе:

- в соответствии с реализованным по умолчанию алгоритмом кипение натрия начинается, когда температура жидкости становится больше температуры насыщения при заданном давлении в данной расчётной ячейке. Однако экспериментально зафиксированы перегревы натрия от нуля до сотен градусов [48–50]. Поскольку величина перегрева зависит от многих режимных и конструктивных факторов, которые могут изменяться во времени, то корректный выбор величины начального перегрева приобретает экспертный характер или может рассматриваться как случайная величина. По этой причине в модуле реализована возможность задания величины перегрева пользователем, учитывая конструктивные особенности конкретной РУ;

- наиболее характерным для щелочного металла механизмом наступления кризиса теплоотдачи в канале является высыхание жидкой плёнки в дисперсно-кольцевом потоке, то есть кризис второго рода, наступление которого определяется граничным балансовым паросодержанием [51]. В связи с этим кризис первого рода для натриевого теплоносителя в теплогидравлическом модуле интегрального кода ЕВКЛИД/V1 не моделируется;

- для моделирования процессов, протекающих при разрыве трубок парогенератора, в теплогидравлическом модуле реализована специальная модель, которая позволяет рассчитывать скорость истечения пароводяной смеси, выход продуктов реакции и тепловой эффект реакции.

Карта режимов течения и замыкающие соотношения для свинцового и свинцово-висмутового теплоносителей

Свинцовый и свинцово-висмутовый теплоносители в достаточно широком диапазоне давлений и температур можно рассматривать как однофазную жидкость. Многофазные состояния этих теплоносителей, обусловленные их вскипанием, в настоящее время в теплогидравлическом модуле интегрального программного комплекса ЕВКЛИД/V1 не моделируются. Однако для моделирования межконтурных течей парогенератора РУ типа БРЕСТ-ОД-300, СВБР-100, транспорта неконденсируемых газов в свинцовом теплоносителе, которые могут появиться в результате разгерметизации твэла, и ряда других процессов помимо однофазной области течения необходимо выделить двухфазную область, для которой должны

использоваться специфические для каждого режима течения замыкающие соотношения при решении уравнений сохранения энергии, импульса и массы. Для описания этих ситуаций выделяются следующие режимы течения: пузырьковый, снарядный и кольцевой (смотреть таблицу 2.1). Однофазные режимы течения являются предельными случаями пузырькового и кольцевого. Данный подход широко используется для моделирования кипения водяного и натриевого теплоносителей. Границы между пузырьковым и снарядным режимами, а также между снарядным и кольцевым аналогичны границам режимов, используемым в коде SIMMER-III [14].

Таблица 2.1 – Карта режимов течения

Пузырьковый режим	Снарядный режим	Кольцевой режим
$0 \leq \varphi_g \leq 0,3$	$0,3 < \varphi_g < 0,7$	$0,7 \leq \varphi_g \leq 1$

Ниже представлены замыкающие соотношения для описания теплогидродинамических процессов, протекающих в тяжёлых жидкометаллических теплоносителях. Следует отметить, что большинство приведённых соотношений являются общими для натриевого и тяжёлых жидкометаллических теплоносителей. Различия связаны с отличиями в картах режимов течения, что приводит к необходимости определения межфазных взаимодействий и взаимодействий фаз со стенками каналов в соответствующих областях, необходимостью описания геометрических особенностей рассматриваемых установок (пучки оребрённых стержней в реакторных установках с натриевым теплоносителем, в то время как в РУ БРЕСТ-ОД-300 дистанционирование осуществляется с помощью дистанционирующих решёток, различные конструкции парогенератора и так далее), а также различиями в значениях безразмерных параметров, в которых должны быть определены замыкающие зависимости.

При этом следует отметить, что в результате анализа замыкающих зависимостей и результатов экспериментальных исследований по теплообмену ЖМТ было показано, что результаты экспериментов (если учесть поправки на влияние оксидной плёнки для ТЖМТ, отбраковать эксперименты, в которых отсутствовал контроль за чистотой металла, и устранить неточности при обработке экспериментальных данных, например, неучёт продольной теплопроводности) описываются одними и теми же замыкающими зависимостями в широком диапазоне безразмерных параметров.

Особого внимания при описании процессов теплообмена в тяжёлых жидкометаллических теплоносителях заслуживает влияние на замыкающие зависимости качества (чистоты) теплоносителя и толщины оксидной плёнки. При разработке моделей сделано предположение, что конструкторами реакторных установок с ТЖМТ будут обеспечены контроль качества теплоносителя и поддержание концентрации кислорода в узком разрешённом диапазоне $(1-4) \cdot 10^{-6} \% \text{ мас.}$ В этих условиях по результатам экспериментов, проведённых в АО «ГНЦ РФ-ФЭИ», АО «НПО ЦКТИ», Нижегородском государственном техническом университете и ИТ СО РАН на тяжёлых жидкометаллических теплоносителях, показано, что в указанном диапазоне содержания кислорода можно использовать соотношения общие для ЖМТ, приведённые ниже. В случае отклонения от указанного диапазона пользователь должен самостоятельно оценить толщину образовавшейся оксидной плёнки и ввести поправочные множители к замыкающим соотношениям (при использовании программного комплекса ЕВКЛИД/V1 через файл ввода входных данных, соответствующая возможность в интегральном программном комплексе реализована). При наличии оксидной плёнки число Нуссельта можно определить в соответствии с соотношением:

$$Nu^* = Nu \frac{1}{\left(1 + \frac{\delta}{\lambda_{ox}} \frac{Nu \lambda_f}{D}\right)},$$

где δ – толщина оксидной плёнки, м; λ_{ox} – теплопроводность оксидной плёнки, Вт/(м К); Nu – число Нуссельта, определённое в соответствии с соотношениями, которые будут приведены ниже.

Аналогичным образом можно оценить поправку на величину контактного теплового сопротивления, возникающего, например, в случае отложения примесей на поверхности контура:

$$Nu^* = Nu \frac{1}{\left(1 + R_c \frac{Nu \lambda_f}{D}\right)},$$

где R_c – контактное тепловое сопротивление, $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$.

Трение со стенками канала

Для однофазного потока жидкости или газа (k – идентификатор фазы) потери давления на трение, входящие в уравнения сохранения импульса, обычно записывают через удельный массовый расход G_k и плотность ρ_k теплоносителя в виде (D_H – гидравлический диаметр):

$$\tau_{wk} = \left(\frac{dP}{dz} \right)_k = \frac{1}{D_H} \xi_k \frac{G_k^2}{2\rho_k}. \quad (2.15)$$

Коэффициент трения ξ_k является функцией числа Рейнольдса, а также зависит от геометрии канала. Перечень используемых в теплогидравлическом модуле интегрального программного комплекса ЕВКЛИД/V1 соотношений для расчёта коэффициента трения в каналах разной геометрии представлен в таблице 2.2.

Для обеспечения гладкого перехода между соотношениями для ламинарного и турбулентного режимов, приведёнными в таблице 2.2, в программном комплексе используется интерполяция, а также выделяется переходная область там, где это необходимо.

Таблица 2.2 – Замыкающие соотношения для трения о стенку: гидравлическое сопротивление ξ в зависимости от геометрии канала и условий течения

Геометрия	Замыкающие соотношения	Источ-ник	Погреш-ность
Каналы простой формы			
Круглая труба	Ламинарное течение (аналитическое решение): $\xi_k = \frac{64}{Re_k}$, при $Re_k < 2300$.	[52]	$\pm 0 \%$
	Турбулентное течение: Для трубы с гладкой внутренней поверхностью (формула Филоненко) ($4 \cdot 10^3 < Re < 10^8$): $\xi_k = (1,82 \lg Re_k - 1,64)^{-2}$, при учёте шероховатости формула справедлива при $Re < 500 D_H/k_s$, где k_s – абсолютная шероховатость, D_H – гидравлический диаметр, м. Для трубы с шероховатой внутренней поверхностью (формула Альтшуля): $\xi_k = 0,11 \left(\frac{k_s}{D_H} + \frac{68}{Re_k} \right)^{0,25}$, при $Re_k > 2,3 \cdot 10^3$	[53]	$\pm 5 \%$
		[54]	$\pm 5 \%$

Продолжение таблицы 2.2

Геометрия	Замыкающие соотношения	Источ-ник	Погреш-ность
Каналы сложной формы			
Концентри-ческий кольцевой зазор, $\theta = R_1/R_2$, R_1, R_2 – внутренний и внешний радиусы канала	Ламинарное течение: Для концентрического кольцевого зазора: $\xi_{0,k} = \frac{64(1-\theta^2)}{Re_k \left(1+\theta^2 + \left[1-\theta^2\right]/\ln \theta\right)}, Re_k \leq 2300;$ Для кольцевого зазора с эксцентриситетом: $\xi_k = \xi_{0,k} \frac{[1+0,25e^2(1-\theta)/(\theta)](1-\theta^2)}{[1+e^2[3-4,5(1-\theta)+2(1-\theta)^2]/(\theta(1-\theta))][1+\theta^2+(1-\theta)/\ln \theta]}$ где $\xi_{0,k}$ рассчитывается по формуле для концентрического кольцевого зазора, $e = \frac{a}{R_2 - R_1}, a - \text{смещение центров окружностей, м};$ $Re_k \leq 2300; 0,3 < 0,1 + 0,5e < \theta$.	[53]	$\pm 5 \%$ $\pm 8 \%$
Концентри-ческий кольцевой зазор, $\theta = R_1/R_2$, R_1, R_2 – внутренний и внешний радиусы канала	Турбулентное течение: Для концентрического кольцевого зазора $\xi_{0,k} = \frac{64}{Re_k} \left[\frac{1-\theta}{1 + [1-\theta^2]/\ln \theta^2} \right]^{0,62} (1 + 0,04\theta), \text{ при}$ $2300 < Re_k < 4 \cdot 10^6; 0,06 < \theta < 1,00$ Для кольцевого зазора с эксцентриситетом ($Re_k = 6 \cdot 10^3 \div 2,5 \cdot 10^5$): $\xi_k = \xi_{0,k} \frac{1+0,25e^2(1-\theta)/\theta}{\left(1+e^2[0,577-0,866(1-\theta)+0,46(1-\theta)^2]/[\theta(1-\theta)]\right)^{1,78}}$ где $\xi_{0,k}$ вычисляется по формуле для концентрического кольцевого зазора, $e = \frac{a}{R_2 - R_1}, \text{ где } a - \text{смещение центров окружностей, м.}$	[53]	$\pm 8 \%$
Пучки гладких стержней. $x = s/d$ – относительный шаг решётки пучка стержней.			

Продолжение таблицы 2.2

Геометрия	Замыкающие соотношения	Источ-ник	Погреш-ность
При расчёте числа Рейнольдса в случае треугольных и квадратных сборок в качестве характерного размера принимается гидравлический диаметр «бесконечной» решетки стержней: – для треугольной упаковки $D_H = d \cdot (2\sqrt{3}x^2/\pi - 1)$; – для квадратной упаковки $D_H = d \cdot (4x^2/\pi - 1)$.			
Треугольная упаковка	Ламинарное течение: $\xi_k = \frac{64K}{Re_k}$ при $Re_k \leq 2 \cdot 10^3$, $1,0 < x < 2,0$; значения коэффициентов К приведены в таблице 2.3.	[53]	При $1,0 \leq x \leq 1,4$ $\pm 12 \%$ При $1,4 < x < 2,0$ $\pm 8 \%$
	Турбулентное течение: $\xi_k = \frac{0,21}{Re_k^{0,25}} \left[1 + (x-1)^{0,32} \right]$, при $1,0 \leq x \leq 1,5$ и $6 \cdot 10^3 \leq Re_k \leq 2 \cdot 10^5$.	[55]	$\pm 10\%$
Квадратная упаковка	Ламинарное течение: $\xi_k = \frac{64K}{Re_k}$ при $Re_k \leq 2 \cdot 10^3$, $1,0 < x < 2,0$; значения коэффициентов К приведены в таблице 2.3.	[53]	При $1,0 \leq x \leq 1,4$ $\pm 12 \%$ При $1,4 < x < 2,0$ $\pm 8 \%$
	Турбулентное течение: $\frac{\xi_k}{0,316 Re_k^{-0,25}} = 0,59 + 0,19(x-1) + 0,52(1 - \exp[-10(x-1)])$, при $1,0 \leq x \leq 2,0$; $10^4 \leq Re \leq 5 \cdot 10^5$.	[53]	$\pm 10 \%$
Поперечное обтекание пучка труб z – число рядов труб, $x_1 = s_1/d$; $x_2 = s_2/d$, s_1, s_2 – поперечный и продольный шаги расположения труб, $\varphi_0 = (x_1 - 1)/(x_2 - 1)$			
Коридорное расположение труб	$\xi_k = \xi_{0,k} z$, где $\xi_{0,k}$ – коэффициент сопротивления одного ряда: $\xi_{0,k} = 2(x_1 - 1)^{-0,5} Re_k^{-0,2}$ при $x_1 = 1,1 \div 7$; $x_1 < x_2$; $\varphi_0 = 0,06 \div 1$ или	[56]	–

Продолжение таблицы 2.2

Геометрия	Замыкающие соотношения	Источ-ник	Погреш-ность
Коридорное расположение труб	$\xi_{0,k} = 0,38(x_1 - 1)^{-0,5}(\varphi_0 - 0,94)^{-0,59} Re_k^{-0,2} / (\varphi_0)^2$ при $x_1 = 1,1 \div 7$; $x_1 > x_2$; $\varphi_0 = 1 \div 8$.		
Шахматное расположение труб	$\xi_k = \xi_{0,k} \cdot (z+1)$, где $\xi_{0,k} = C \cdot Re_k^{-0,27}$, значения C приведены в таблице 2.4 в зависимости от коэффициента $\psi = \frac{x_1 - 1}{\sqrt{x_1^2 / 4 + x_2^2} - 1}$ и относительного большего $x_1 = s_1/d$ шага решётки труб.	[56]	—

При расчёте числа Рейнольдса в случае поперечного обтекания пучков труб в качестве характерных параметров принимаются наружный диаметр труб и средняя скорость в узком сечении пучка.

Таблица 2.3 – Значения коэффициента K в формулах из таблицы 2.2 для расчёта коэффициента гидравлического сопротивления в случае продольного обтекания пучков стержней

x	1,00	1,02	1,05	1,10	1,20	1,30	1,40	1,50	2,0
треугольная решётка	0,407	0,663	0,966	1,274	1,560	1,715	1,834	1,940	2,462
квадратная решётка	0,406	0,518	0,679	0,913	1,264	1,510	1,699	1,858	2,518

Таблица 2.4 – Значения коэффициента C в формуле из таблицы 2.2 для расчёта коэффициента гидравлического сопротивления в случае поперечного обтекания треугольного пучка труб

ψ	x_1	C
0,1–1,7	$\geq 1,44$	$C = 3,2 + 0,66(1,7 - \psi)^{1,5}$
0,1–1,7	$< 1,44$	$C = 3,2 + 0,66(1,7 - \psi)^{1,5} + ((1,44 - x_1)/0,11)[0,8 + 0,20(1,7 - \psi)^{1,5}]$
1,7–6,5	$1,44 \div 3$	$C = 0,44(\psi + 1)^2$
1,7–6,5	$< 1,44$	$C = [0,44 + (1,44 - x_1)](\psi + 1)^2$
$\geq 1,7$	$3 \div 10$	$C = 0,062 + 0,21(10 - x_1)^{-0,24}$

Теплообмен со стенкой

Для расчёта теплообмена со стенкой используются соотношения:

$$\begin{aligned} q_{wf} &= C_{Qf} \cdot \alpha_{wf} \cdot (T_w - T_f) \\ q_{wg} &= C_{Qg} \cdot \alpha_{wg} \cdot (T_w - T_g) \end{aligned} \quad (2.16)$$

где C_{Qf} равен 1, а C_{Qg} равен 0 для всех режимов, в которых $\varphi \neq 1$, а для $\varphi = 1$ C_{Qf} равен 0, а C_{Qg} равен 1.

Коэффициент теплоотдачи для фазы $k = \{f, g\}$ рассчитывается по формуле:

$$\alpha_{wk} = Nu_k \frac{\lambda_k}{D_H}. \quad (2.17)$$

Число Нуссельта для газовой фазы: $Nu_g = 0,023 \cdot Re_g^{0,8} Pr_g^{0,4}$. Корреляции для расчёта числа Нуссельта для жидкой фазы в зависимости от геометрии канала и условий течения представлены в таблице 2.6.

Теплообмен при свободной конвекции определяется числами Грасгофа ($Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot H^3}{\nu \cdot a}$) и Прандтля ($Pr = \frac{\nu}{a}$). Здесь β – температурный коэффициент объёмного расширения, K^{-1} , ν – кинематическая вязкость m^2/c , a – температуропроводность.

Для описания теплообмена при свободной тепловой конвекции в металлических средах используются следующие соотношения [57]:

– Для вертикальных стенки и цилиндра:

в области $500 < Pr \cdot Gr < 6 \cdot 10^9$ (ламинарное течение)

$$Nu = 0,755 \cdot (Pr^2 Gr)^{1/4}, \quad (2.18)$$

в области $Pr \cdot Gr > 4 \cdot 10^{10}$ (турбулентное течение)

$$Nu = 0,13 \cdot (Pr^2 \cdot Gr)^{1/3}. \quad (2.19)$$

Точность (2.18) и (2.19) определяется в [52] как $\pm 15\%$.

В переходной области $6 \cdot 10^9 \leq Pr \cdot Gr \leq 4 \cdot 10^{10}$ используется интерполяция. Линейный размер в числе Грасгофа в (2.18) и (2.19) – высота.

– Теплоотдача в плоском зазоре между двумя поверхностями, наклонёнными под углом к горизонтали, определяется в диапазонах $0,02 < Pr < 1,2 \cdot 10^4$, $5 < L/\delta < 18$ (L – размер по горизонтали, δ – величина зазора), $5 \cdot 10^4 < Pr \cdot Gr < 7 \cdot 10^8$ (здесь линейный размер δ – величина зазора) в соответствии с соотношением [57]:

$$Nu = C \cdot (Pr \cdot Gr)^{1/3} Pr^{0,074}, \quad (2.20)$$

где C зависит от угла наклона к горизонтали и определен в таблице 2.5 ниже.

Таблица 2.5 – Константа C в зависимости от угла наклона φ

φ , град	0	30	45	60	90
C	0,07	0,065	0,06	0,057	0,05

Число Нуссельта при свободной конвекции для ТВС, состоящей из вертикальных твэлов высотой H и радиусом r , для жидкой фазы рассчитывается по (2.21), полученной путём расширения формулы для одиночного цилиндра из [52]:

$$Nu_f = 0,16 \cdot \left(\frac{Gr \cdot Pr \cdot r}{H} \right)^{0,3}. \quad (2.21)$$

При смешанной конвекции в плотной упаковке стержней число Нуссельта вычисляется по формуле [52]:

$$Nu = Nu_{\text{вынужд}} \left(1 + 3 \cdot 10^{-3} (Gr Pr^2) \exp[-0,007 Pe^3] \right), \quad (2.22)$$

где $Nu_{\text{вынужд}}$ – число Нуссельта при вынужденной конвекции при том же числе Пекле, которое вычисляется по корреляциям для пучков стержней из таблицы 2.6. Диапазон применимости: $Gr Pr^2 = 0 \div 500$; $Pe = 30 \div 1000$.

Для гладкого перехода между соотношениями для ламинарного и турбулентного режимов, приведёнными в таблице 2.6, в программном комплексе используется интерполяция, а также выделяется переходная область там, где это необходимо.

Таблица 2.6 – Теплообмен со стенкой для каналов в зависимости от геометрии канала и условий течения

Геометрия	Замыкающие соотношения	Источ-ник	Погреш-ность
Каналы простой формы			
Круглая труба	Случай постоянного теплового потока на стенке трубы. Ламинарное течение (аналитическое решение): $Nu = 4,36$.	[53]	$\pm 0 \%$

Геометрия	Замыкающие соотношения	Источник	Погрешность
Каналы простой формы			
Круглая труба	Турбулентное течение: $Nu = 5 + 0,025 Pe^{0,8}$ при $Pe < 10^4$.	[58]	$\pm 20 \%$
Каналы сложной формы			
Концентрический кольцевой зазор	Турбулентное течение. Односторонний обогрев: $Nu = 6 + 0,02 Pe^{0,8}$ при $1,05 \leq d_2/d_1 \leq 2$; $300 \leq Pe \leq 4000$	[52]	$\pm 15 \%$
Диаметры: d_1 – внутренней стенки канала, d_2 – наружной стенки канала.	Турбулентное течение. Двусторонний обогрев: для расчёта теплообмена на внутренней стенке используется формула $Nu_1 = 10 + 0,028 Pe^{0,8}$, на внешней стенке $Nu_2 = 7,2 + 0,028 Pe^{0,8}$, при $1,05 \leq d_2/d_1 \leq 2$; $300 \leq Pe \leq 4000$.	[52]	$\pm 20 \%$
Пучки стержней (труб). Продольное обтекание. $x = s/d$ – относительный шаг решётки пучка стержней			
Треугольная решётка	Ламинарный режим: При $1 \leq x \leq 1,2$: $Nu_{\lambda} = \left(7,55x - \frac{6,3}{x^{17x(x-0,81)}} \right) \left(1 - \frac{3,6x}{x^{20}(1 + 2,5\varepsilon_6^{0,86}) + 3,2} \right),$ где ε_k – параметр теплового подобия ($k = 6$ для треугольной решётки). При $1,2 \leq x \leq 2$: $Nu_{\lambda} = 7,55x - 20x^{-13}$	[58]	$\pm 30 \%$
	В критериях Nu и Pe за характерный размер принят эквивалентный гидравлический диаметр «бесконечной» решетки твэлов.		$\pm 20 \%$

Продолжение таблицы 2.6

Геометрия	Замыкающие соотношения	Источ- ник	Погреш- ность
	Турбулентный режим: Для $\varepsilon_6 > 0,01$ $Nu = Nu_{\text{л}} + f(\varepsilon_6, x) Re^{\varphi(x)},$ где $Nu_{\text{л}}$ – число Нуссельта для ламинарного режима течения, ε_k – параметр теплового подобия ($k = 6$ для треугольной решётки) из [51]. При $1 \leq x \leq 1,2$: $f(\varepsilon_6, x) = \frac{0,041}{x^2} \left(1 - \frac{1}{\frac{x^{30}-1}{6} + \sqrt{1,24\varepsilon_6 + 1,15}} \right),$ $\varphi(x) = 0,56 + 0,19(x) - \frac{0,1}{(x)^{80}},$ При $1,2 \leq x \leq 2$: $f(\varepsilon_6, x) = f(x) = \frac{0,041}{x^2}, \quad \varphi(x) = 0,56 + 0,19x.$ В критериях Nu и Re за характерный размер принят эквивалентный гидравлический диаметр «бесконечной» решетки твэлов: для треугольной упаковки $D_H = d \cdot (2\sqrt{3}x^2 / \pi - 1)$. Приведённые для треугольной решётки гладких твэлов соотношения для ламинарного и турбулентного режимов применимы в диапазоне $1 \leq Re \leq 4000$.	[52]	$\pm 12 \%$

Продолжение таблицы 2.6

Геометрия	Замыкающие соотношения	Источ- ник	Погреш- ность
Пучки стержней (труб). Поперечное обтекание решётки гладких стержней			
Шахматное и коридор- ное располо- жение стержней	При $10 \leq Re \leq 1300$: $Nu_{90} = 2Re^{0,5}.$ Здесь число Re определено по скорости набегающего потока и наружному диаметру труб.	[52]	$\pm 30 \%$
Пучки стержней (труб). Поперечное обтекание пучков труб под углом между направлением потока и осью стержня $30^\circ \leq \theta < 90^\circ$			
Шахматное и коридор- ное располо- жение стержней	Для $10 \leq Re \leq 600$: $Nu = Nu_{90} \sin^{0,4} \theta.$	[52]	$\pm 30 \%$
Пучки стержней (труб). Поперечное обтекание пучков стержней под углом между направлением потока и осью стержня $0^\circ \leq \theta < 30^\circ$			
Шахматное и коридор- ное располо- жение стержней	Для $10 \leq Re \leq 600$: $Nu = Nu_{90} (\sin \theta + \sin^2 \theta)^{0,5} (1 + \sin^2 \theta).$	[52]	$\pm 30 \%$

Площадь межфазной поверхности

Выражение для расчёта плотности площади межфазной поверхности a_i зависит от режима течения теплоносителя и типа геометрии канала. Согласно принятой карте режимов (таблица 2.1) в коде используются соотношения, представленные ниже (таблица 2.7).

Таблица 2.7 – Расчёт плотности площади межфазной поверхности для свинцового теплоносителя

Режим	Многостержневая сборка	Круглая труба
Пузырьковый режим	$a_i = \begin{cases} \frac{8 \cdot \pi \cdot D_b}{3(2 \cdot \sqrt{3} \cdot s^2 - \pi \cdot d^2)}, & \text{если } D_b = D_{b1}, [58] \\ \frac{6 \cdot \varphi_g}{D_b}, & \text{если } D_b = D_{b2}, [59] \end{cases},$ $D_b = \min[D_{b1}; D_{b2}],$ $D_{b1} = \min \left(\sqrt{\frac{3 \cdot \varphi_g}{4 \cdot \pi} (2 \cdot s^2 \cdot \sqrt{3} - \pi \cdot d^2)}; 0,9 \cdot D_H \right),$ $D_{b2} = \frac{1,987 D_H^{0,335} v_f^{0,239}}{g^{0,174}} \cdot \left(\frac{\sigma}{(\rho_f - \rho_g)} \right)^{0,174} \varepsilon^{-0,0796},$ $\varepsilon = g \cdot j_g \cdot \exp(-0,0005839 Re_f) + \frac{ j }{\rho_m} \cdot \left(-\frac{dP}{dz} \right)_F \times [1 - \exp(-0,0005839 Re_f)],$ $Re_f = \frac{j_f D_H}{v_f}, \quad j_g, \quad j - \text{приведённые скорости газа и смеси соответственно:}$ $j_g = v_g \cdot \varphi, \quad j = v_g \cdot \varphi + v_f \cdot (1 - \varphi), \quad \rho_m - \text{плотность смеси, } \left(-\frac{dP}{dz} \right)_F - \text{потери давления на трение двухфазной смеси.}$	$a_i = \frac{6 \cdot \varphi_g}{D_b} [60], \quad D_b < 0,9 \cdot D_H,$ $D_b = \frac{1,987 D_H^{0,335} v_f^{0,239}}{g^{0,174}} \cdot \left(\frac{\sigma}{(\rho_f - \rho_g)} \right)^{0,174} \varepsilon^{-0,0796}, [61]$ $\varepsilon = g j_g \exp(-0,0005839 Re_f) + \frac{ j }{\rho_m} \left(-\frac{dP}{dz} \right)_F \times [1 - \exp(-0,0005839 Re_f)]$ $Re_f = \frac{j_f D_H}{v_f}, \quad j_g, \quad j - \text{приведённые скорости газа и смеси соответственно, } \rho_m - \text{плотность смеси, } \left(-\frac{dP}{dz} \right)_F - \text{потери давления на трение двухфазной смеси.}$ Погрешность корреляции составляет 22 % [55].

Продолжение таблицы 2.7

Режим	Многостержневая сборка	Круглая труба
Снарядный режим	$a_i = \frac{C^*}{D^*} \cdot \frac{\varphi - \varphi_{gs}}{1 - \varphi_{gs}} + \frac{6\varphi_{gs}}{D_b} \frac{1 - \varphi}{1 - \varphi_{gs}} \quad [62], \quad \varphi_{gs} = 0,3,$ $D_b = 2 \cdot La \cdot (1 - XS) + \min(40 \cdot La; 0,9 \cdot D_H) \cdot XS$ $La = \sqrt{\frac{\sigma_f}{g \cdot (\rho_f - \rho_g)}} ,$ $XS = \begin{cases} 0; & \varphi_g < \varphi_{gs} \\ \frac{\varphi_g - \varphi_{sl}}{\varphi_{sl} - \varphi_{gs}}; & \varphi_{gs} \leq \varphi_g < \varphi_{sl} , \\ 1; & \varphi_g \geq \varphi_{sl} \end{cases}$ $C^* = \begin{cases} 4,5 & D_H < 50 \cdot La \\ 16 & D_H \geq 50 \cdot La \end{cases} ,$ $D^* = \begin{cases} D_H & D_H < 50 \cdot La \\ D_{h,crit} & D_H \geq 50 \cdot La \end{cases} ,$ $D_{h,crit} = 50 \cdot La \quad - \quad \text{критический гидравлический диаметр.}$	$a_i = \frac{C^*}{D^*} \cdot \frac{\varphi - \varphi_{gs}}{1 - \varphi_{gs}} + \frac{6\varphi_{gs}}{D_b} \frac{1 - \varphi}{1 - \varphi_{gs}} \quad [62],$ $\varphi_{gs} = 0,3,$ $D_b = 2 \cdot La \cdot (1 - XS) + \min(40 \cdot La; 0,9 \cdot D_H) \cdot XS ,$ $La = \sqrt{\frac{\sigma_f}{g \cdot (\rho_f - \rho_g)}} ,$ $C^* = \begin{cases} 4,5 & D_H < 50 \cdot La \\ 16 & D_H \geq 50 \cdot La \end{cases} ,$ $D^* = \begin{cases} D_H & D_H < 50 \cdot La \\ D_{h,crit} & D_H \geq 50 \cdot La \end{cases} ,$ $D_{h,crit} = 50 \cdot La \quad - \quad \text{критический гидравлический диаметр.}$
Кольцевой режим	$a_i = \frac{4 \cdot \sqrt{\pi}}{3 \cdot d \cdot (2 \cdot \sqrt{3} \cdot (s/d)^2 - \pi)} \times$ $\times \sqrt{(1 - \varphi_g) 2 \sqrt{3} (s/d)^2 + \pi \cdot \varphi_g}$	$a_i = 4 \sqrt{\varphi_g} / D_H$

Межфазное трение

Формулы для расчёта межфазного трения:

$$\tau_{ig} = \chi |v_g C_1 - v_f C_0| (v_g C_1 - v_f C_0) = \kappa_{igf} v_f + \kappa_{igg} v_g, \quad \tau_{if} = -\tau_{ig}. \quad (2.23)$$

Здесь $\kappa_{igg} = \chi |v_g C_1 - v_f C_0| C_1$, $\kappa_{igf} = -\chi |v_g C_1 - v_f C_0| C_0$, коэффициент C_0 – параметр распределения Зубера, учитывающий радиальное распределение газосодержания в канале.

$$C_1 = \frac{1 - \varphi_g \cdot C_0}{1 - \varphi_g}. \quad (2.24)$$

Параметр Зубера во всех режимах, кроме пузырькового в вертикальном канале, равен 1.

Соотношения для расчёта коэффициента межфазного трения в зависимости от режима течения и геометрии канала представлены в таблице 2.8.

Таблица 2.8 – Соотношения для расчёта коэффициента межфазного трения

Режим	Горизонтальный канал	Вертикальный канал
Пузырьковый режим	$\kappa_{igg} = C_b \cdot \rho_f \cdot v_f - v_g a_i / 8,$ $\kappa_{igf} = -\kappa_{igg},$ $C_b = \frac{24}{Re_b} (1 + 0,15 Re_b^{0,687}) + \frac{0,42}{1 + 4,25 \cdot 10^4 Re_b^{-1,16}}$ +6..-4 % [63], $Re_b = D_b \cdot \rho_f \frac{ v_f - v_g }{\mu_f}$	$\kappa_{igf} = -C_0 \cdot \chi \cdot C_0 \cdot v_f - C_1 \cdot v_g ,$ $\kappa_{igg} = C_1 \cdot \chi \cdot C_0 \cdot v_f - C_1 \cdot v_g ,$ $C_0 = 1,2 - 0,2 \cdot \sqrt{\rho_g / \rho_f},$ $C_1 = (1 - C_0 \cdot \varphi_g) / (1 - \varphi_g) \quad [64],$ $\chi = 0,75 \cdot C_{DB} \cdot \varphi_g \cdot \rho_f / D_b,$ $C_{DB} = \frac{24}{Re_b} (1 + 0,15 Re_b^{0,687}) + \frac{0,42}{1 + 4,25 \cdot 10^4 Re_b^{-1,16}}$ +6..-4 % [63], $Re_b = D_b \cdot \rho_f \cdot v_f - v_g / \mu_f$
Снарядный режим	$\kappa_{igg} = C_s \rho_f v_f - v_g a_i / 8,$ $\kappa_{igf} = -\kappa_{igg},$ $C_s = \frac{24}{Re_s} (1 + 0,15 Re_s^{0,687}) + \frac{0,42}{1 + 4,25 \cdot 10^4 Re_s^{-1,16}},$ $Re_s = D_b \cdot \rho_f \frac{ v_f - v_g }{\mu_f}$	$\kappa_{igf} = -C_0 \chi C_0 v_f - C_1 v_g ,$ $\kappa_{igg} = C_1 \chi C_0 v_f - C_1 v_g ,$ $C_0 = 1,2 - 0,2 \sqrt{\rho_g / \rho_f},$ $C_1 = (1 - C_0 \varphi) / (1 - \varphi) \quad [64],$ $\chi = 0,75 C_{sl} \cdot \varphi \cdot \rho_f / D_b,$ $C_{sl} = \frac{1}{k^2(N_f, Eo)} \frac{D_b}{D_h} \quad [65],$ $Eo = \frac{g D_h^2 \Delta \rho}{\sigma},$ $N_f = \frac{\sqrt{D_h^3 \rho_f g \Delta \rho}}{\mu_f},$ $k = 0,345 \left(1 - e^{\frac{-0,01 N_f}{0,345}} \right) \left(1 - e^{\frac{3,37 - Eo}{m}} \right),$

Продолжение таблицы 2.8

Режим	Горизонтальный канал	Вертикальный канал
Снарядный режим		$m = \begin{cases} 10; & N_f > 250; \\ 69N_f^{-0,35}; & 18 < N_f < 250; \\ 25; & N_f < 18; \end{cases}$
Кольцевой режим	$\kappa_{igg} = C_{an} \cdot \rho_g \cdot a_{ifilm} \cdot v_g - v_f / 8$, где $a_{ifilm} = 4 \frac{\sqrt{\varphi_g}}{D_H}$ Коэффициент межфазного трения для различных гидравлических режимов: $C_{an} = \begin{cases} C_{an500} = \frac{64}{Re_{gl}}, & Re_{gl} < 500 - \text{лам. режим}, \\ C_{an1500} = 0,02 \left(1 + 150 \frac{1 - \varphi_g}{1 + \sqrt{\varphi_g}} \right), & Re_{gl} > 1500 - \text{турб. реж.} \\ C_{an500} \frac{1500 - Re_{gl}}{1000} + C_{an1500} \frac{Re_{gl} - 500}{1000}, & 500 \leq Re_{gl} \leq 1500 \end{cases}$ Погрешность расчёта C_{an500} составляет $\pm 5\%$, C_{an1500} – $\pm 17\%$ [65]. $Re_{gl} = \frac{ v_f - v_g \cdot D_H \cdot \rho_g \cdot \sqrt{\varphi_g}}{\mu_g} - \text{число Рейнольдса для газового ядра.}$	

Межфазный теплообмен

Для расчёта скорости межфазного теплообмена учтем условие теплового баланса на межфазной границе:

$$Q_{if} + Q_{ig} = 0, \quad Q_{if} = \alpha_{if} (T_i - T_f) a_i, \quad Q_{ig} = \alpha_{ig} (T_i - T_g) a_i, \quad (2.25)$$

где T_i – температура на межфазной границе, α_{if}, α_{ig} – коэффициенты теплоотдачи на межфазной границе со стороны жидкости и газа соответственно.

При пузырьковом режиме:

$$\alpha_{ig} \cdot a_i = \frac{c_{pg} \cdot \rho_g \cdot \varphi}{\tau}, \quad (2.26)$$

где $\tau = \frac{D_b}{24 \cdot \lambda_g}$ – характерное «релаксационное» время.

Для кольцевого режима используется следующая формула:

$$\alpha_{ig} = Nu_g \frac{\lambda_g}{D_H \sqrt{\phi}}, \quad Nu_g = 0,023 \cdot Re_g^{0,8} Pr_g^{0,4}, \quad Re_g = \frac{|v_f - v_g| \cdot D_H \cdot \rho_g \cdot \sqrt{\phi}}{\mu_g}. \quad (2.27)$$

Для расчёта коэффициентов теплоотдачи при переходном между пузырьковым и кольцевым режимом также используется интерполяционная процедура.

Карта режимов течения и теплообмена и замыкающие соотношения для водяного теплоносителя

Карты режимов течения и теплообмена и замыкающие соотношения для водяного теплоносителя базируются на разработках авторов расчётного кода КОРСАР, опубликованных в [43–44], [66–69], за исключением соотношения, используемого для описания трения двухфазной смеси о стенку канала, разработанного автором диссертационной работы, которое опубликовано в [39]. Корреляция [39] имеет достаточно простую форму записи и единое описание для всех режимов течения, за исключением расслоенного. Она позволяет «автоматически» осуществлять переход к однофазному случаю. Данная корреляция при сравнении с другими корреляциями для гомогенного и негомогенного (с отдельным движением фаз) типа показала лучший результат при сравнении с экспериментальными результатами последних 60 лет [39]. Потери давления на трение для двухфазного потока определяются по формуле:

$$\left(\frac{dP}{dz} \right)_{2ph} = \xi_{2ph} \cdot \frac{1}{D} \cdot \frac{G_{2ph}^2}{2 \cdot \rho_{2ph}}, \quad (2.28)$$

$$\text{где } \frac{1}{\rho_{2ph}} = \frac{x}{\rho_g} + \frac{1-x}{\rho_f},$$

D – диаметр трубы, м;

G_{2ph} – расход двухфазной смеси, $\text{кг} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$;

ρ_f, ρ_g – плотность жидкости и газа, соответственно, кг/м^3 .

При этом полагается, что в пузырьковом, снарядном, эмульсионном и дисперсно-кольцевом режиме со стенкой взаимодействует только жидкая фаза, а в дисперсном – только газовая.

Для описания потерь давления на трение фаз со стенкой в расслоенном режиме используется модель раздельного течения фаз [66]. Замыкающие соотношения для расчёта коэффициента гидравлического сопротивления двухфазного потока на стенке канала представлены в таблице 2.9.

Таблица 2.9 – Замыкающие соотношения по трению двухфазного потока о стенку

Режим течения	Замыкающие соотношения	Литературный источник
Пузырьковый, снарядный, эмульсионный, дисперсный, дисперсно-кольцевой, обращенный кольцевой	$\xi_{2ph} = \begin{cases} \xi_l & \text{для } Re_{2ph} \leq Re_{cr} \\ \xi_t - (\xi_t - \xi_l) \cdot \exp\left(-\frac{Re_{2ph} - Re_{cr}}{Re_*}\right) & \text{для } Re_{2ph} > Re_{cr}, \end{cases}$ где $Re_{cr} = 2300$, $Re_* = 750$, а значение Re_{2ph} определяется формулой: $Re_{2ph} = \frac{G_{2ph} \cdot D \cdot [x^2 + (1-x)^2 \cdot (\rho_g / \rho_f)]}{\mu_g \cdot x + \mu_f \cdot (1-x) \cdot (\rho_g / \rho_f)},$ $\xi_t = \frac{1}{\left[1,74 - 2 \cdot \lg\left(\frac{2 \cdot k_s}{D} + \frac{49}{Re_{2ph}^{0,91}}\right)\right]^2}, \quad \xi_l = \frac{64}{Re_{2ph}}.$	[39]
Расслоенный режим	$\left(\frac{\partial P}{\partial z}\right)_k = \frac{1}{2} \cdot \xi_k \cdot \rho_k \cdot v_k \cdot v_k \cdot \left \frac{1 - \varphi_w}{D}\right , \text{ где } k - \text{индекс фазы,}$ $\xi_k = \max\left(\frac{64}{Re_k}, \frac{0,316}{Re_k^{0,25}}\right) - \text{коэффициенты сопротивления}$ фаз на стенке, $Re_k = \frac{\rho_k \cdot v_k \cdot d_k}{\mu_k}$, $\varphi_w = \frac{\theta}{\pi}$ – доля поверхности трубы, омываемая газом, θ – угол раскрытия ручья в радианах. $d_f = \frac{4 \cdot A_f}{\Pi_f} = \frac{\pi \cdot (1 - \varphi_g) \cdot D}{\pi - \theta}, \quad d_g = \frac{4 \cdot A_g}{\Pi_g + \Pi_f} = \frac{\pi \cdot \varphi_g \cdot D}{\theta + \sin \theta}.$	[66]

Моделирование теплоносителя с примесью неконденсируемых газов

В теплогидравлическом модуле интегрального программного комплекса ЕВКЛИД/V1 моделируется поведение двухфазного потока теплоносителя: жидкой и газовой фаз. Газовая фаза может состоять из смеси пара и неконденсируемых газов.

В модели, используемой для расчёта теплофизических свойств многокомпонентной парогазовой смеси, предполагается, что:

- компонентный состав неконденсируемых газов задаётся произвольным, но в процессе решения конкретной задачи изменяться не может;
- компоненты в фазах находятся в тепловом и механическом равновесии;
- давление газовой фазы равно сумме парциальных давлений пара и неконденсируемых газов и равно давлению жидкой фазы;
- газы, содержащиеся в фазах, не влияют на теплофизические свойства теплоносителя.

Основными рассчитываемыми параметрами многокомпонентной модели неконденсируемых газов являются энтальпия, вязкость и теплопроводность газовых смесей, а также коэффициенты растворимости газов в теплоносителе, необходимые для описания межфазного массопереноса, описанные в подразделе 3.8 данной диссертационной работы.

Для расчёта теплофизических свойств при наличии в парогазовой фазе неконденсируемых газов требуется рассчитать энтальпию газовой фазы h_g , парциальное давление пара, плотности пара и других компонентов газовой фазы, производные теплофизических свойств по давлению и температуре.

Задача решается с использованием уравнения состояния идеального газа, уравнения Дальтона и нелинейного уравнения для давления пара P_v (2.29)–(2.34):

$$\rho_v = X_v \rho, \quad (2.29)$$

$$\rho_n = X_n \rho, \quad (2.30)$$

$$X_v = 1 - \sum_{n=1}^{N_n} X_n, \quad (2.31)$$

$$P = P_v + \sum_{n=1}^{N_n} \rho_n R_n T, \quad (2.32)$$

$$R = \sum X_n R_0 / M_n, \quad (2.33)$$

$$X_v \cdot (P_v - P) + R \cdot T \cdot \rho_v (P_v, T) = 0, \quad (2.34)$$

где

индекс v относится к пару;

индекс n – к неконденсируемому газу;

ρ – плотность парогазовой смеси, кг/м³;

M_n – молярная масса компонента, кг/моль;

R_0 – универсальная газовая постоянная (Дж·К⁻¹·моль⁻¹);

R – удельная газовая постоянная (Дж·К⁻¹·кг⁻¹);

Постоянная R_n определена как $R_n = R_0 / M_n$.

Моделирование процесса замерзания/плавления тяжёлого жидкометаллического теплоносителя

При снижении температуры стенки до температуры плавления свинцового или свинцово-висмутового теплоносителя начинается его затвердевание. Слой твёрдого свинцового или свинцово-висмутового теплоносителя, образовавшийся на стенках каналов как в активной зоне, так и в межтрубном пространстве парогенератора, может частично или полностью блокировать проходные сечения, ухудшая условия теплообмена и увеличивая гидравлическое сопротивление. Ситуация с замерзанием тяжёлого жидкометаллического теплоносителя в трубопроводах первого контура может иметь место, например, при аварийном расхолаживании реактора, при отказе ГЦН и связанным с этим избыточным отводом тепла вторым контуром. При повышении температуры теплоносителя слой твёрдого свинцового или свинцово-висмутового теплоносителя начинает уменьшаться вплоть до полного исчезновения. Данная модель позволяет описывать как замерзание, так и плавление тяжёлого жидкометаллического теплоносителя (свинец или свинец-висмут).

Если в процессе охлаждения температура на границе раздела жидкий свинец или свинец-висмут/твёрдое тело достигает величины $T_{пл}$, снижение температуры прекращается, и на границе начинает образовываться слой твёрдого свинца или свинца-висмута. При этом температура границы остается равной $T_{пл}$.

В соответствии с условием Стефана [70, 71] изменение толщины слоя твёрдого свинца или свинца-висмута на шаге Δt :

$$\Delta r = \frac{W_s - W_f}{\rho_s H} \Delta t, \quad (2.35)$$

Масса затвердевшего свинца или свинца-висмута на единицу поверхности раздела жидкость/твёрдое тело [кг/м²] на шаге Δt :

$$\Delta m = \frac{W_s - W_f}{H} \Delta t, \quad (2.36)$$

Здесь W_s – поток тепла в слое твёрдого свинца или свинца-висмута на границе с жидким металлом, [Вт/м²]; W_f – поток тепла в жидкости на границе [Вт/м²]; H – теплота плавления свинца или свинца-висмута; ρ_s – плотность твёрдого свинца или свинца-висмута.

Масса затвердевшего свинца Δm положительна, если $W_s > W_f$, то есть поток тепла от границы вглубь твёрдого тела больше потока тепла из жидкости к твёрдому телу.

Если $W_s < W_f$ происходит плавление твёрдого свинца и величины Δm и Δt отрицательны.

По полученным на начало шага потокам тепла в слое твёрдого свинца или свинца-висмута и в жидкости, в соответствии с формулой (2.35), вычисляется приращение толщины слоя твёрдого свинца или свинца-висмута. Полученное значение приращения складывается со значением толщины слоя твёрдого свинца или свинца-висмута с предыдущего шага по времени. Таким образом, получается значение толщины слоя твёрдого свинца или свинца-висмута на новом шаге по времени. Аналогичная операция, в соответствии с формулой (2.36), производится с приращением массы слоя твёрдого свинца.

Наличие слоя твёрдого свинца приводит к уменьшению проходного сечения канала, что учитывается при определении гидравлических характеристик канала и при описании теплообмена.

Моделирование теплообмена между поверхностью расплава и внутренней поверхностью верхней крышки реакторной установки

В проектах реакторных установок с ЖМТ (в частности, БРЕСТ-ОД-300, БН-1200) над открытыми поверхностями расплава предусматривается наличие компенсационных газовых объёмов, заполненных инертным газом. Эти объёмы ограничиваются поверхностью расплава снизу, нижней поверхностью верхней крышки сверху и боковой поверхностью. Между этими поверхностями через газовый зазор в зависимости от граничных условий возможен теплообмен. Основные механизмы этого теплообмена: лучистый (радиационный) и теплообмен путём естественной конвекции.

При температуре поверхности расплава 600–800 К (в случае свинцового теплоносителя), радиационное излучение с открытой поверхности может достигать 20 кВт/м² (для абсолютно чёрного тела), что представляет значительную величину в тепловом балансе, и её необходимо

учитывать. При указанных выше температурах, максимум излучения приходится на инфракрасную область спектра [72]:

$$\lambda_{\max} = \frac{c \cdot h}{2,82 \cdot k \cdot T} \approx 8 \cdot 10^{-6} \text{ м.} \quad (2.37)$$

Газовая подушка обычно состоит из инертного газа аргона при давлениях близких к атмосферному (0,1 МПа). Аргон в этих условиях практически «прозрачен» для инфракрасного излучения, что упрощает задачу расчёта теплообмена с поверхности расплава. В этом случае теплообмен с поверхности расплава рассчитывается как сумма тепловых потоков за счёт естественной конвекции и радиационного излучения, то есть:

$$q_{\Sigma} = q_r + q_{\text{con}}. \quad (2.38)$$

Задачу рассматриваем в упрощенной постановке – пренебрегаем тепловыми потерями через боковую поверхность, полагая, что площадь боковой поверхности значительно меньше поверхности расплава и площади верхней поверхности. Для большинства газовых объёмов в РУ это условие выполняется. Например, для напорного коллектора для РУ БРЕСТ-ОД-300 $S_{\text{бок}} / S_{\text{расплав}} \approx 0,1 \ll 1$. В случае невыполнения этого условия расчёты носят оценочный характер.

При вышеприведённых условиях задача сводится к расчёту теплообмена между двумя бесконечными параллельными пластинами с малым зазором между ними. В этом случае, q_r в (2.38) определяется как [73]:

$$q_r = \varepsilon \sigma_B (T_1^4 - T_2^4), \quad (2.39)$$

$$\varepsilon = \frac{1}{1/\varepsilon_1 + 1/\varepsilon_2 - 1}, \quad (2.40)$$

где T_1, T_2 – температуры нижней и верхней поверхностей соответственно, $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – степени черноты, σ_B – постоянная Стефана–Больцмана.

Для конвективного теплообмена используется соотношение из [74]:

$$q_{\text{con}} = \frac{\lambda_{\text{con}} (T_1 - T_2)}{\delta}, \quad (2.41)$$

$$\lambda_{\text{con}} = 0,18 \cdot \lambda_g \cdot Ra^{1/4}, \quad (2.42)$$

$$Ra = Gr Pr_g = \frac{g \beta (T_1 - T_2) \delta^3}{\nu^2} Pr_g, \quad (2.43)$$

где g – ускорение свободного падения, β – температурный коэффициент объёмного расширения среды, δ – толщина газовой подушки, λ_g – коэффициент теплопроводности газа, ν – коэффициент кинематической вязкости.

В присутствии водяного пара в газовой подушке излучение с поверхности расплава может поглощаться и газовой слой уже не является оптически прозрачным. Расчёты по (2.39)–(2.40) в этом случае являются некорректными. Степень поглощения излучения зависит от парциального давления водяного пара в газовой смеси, размера газового слоя и температуры газа. Её можно определить по номограмме, показанной на рисунке 2.1 [75].

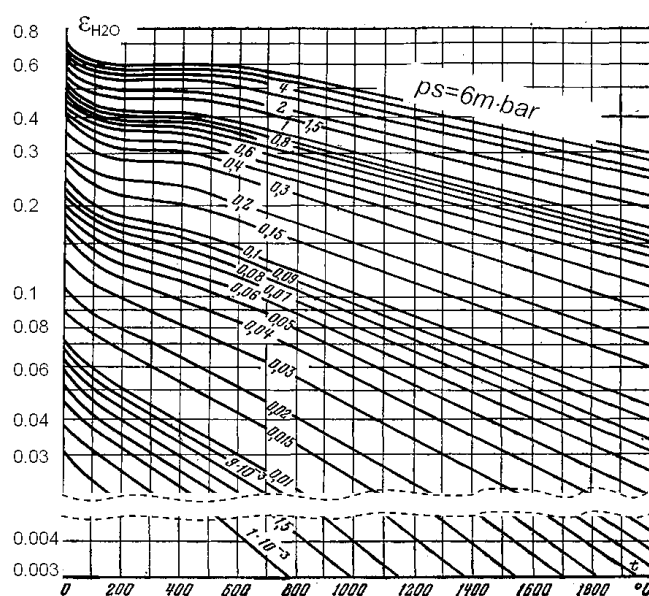


Рисунок 2.1 – Излучательная способность $\epsilon_g(\bar{T}, p_s)$ водяного пара

Например, при парциальном давлении пара 0,1 МПа на длине 1 м и при температуре газа 300°C доля поглощенного потока составляет примерно 0,38 от падающего на границу газового слоя; при давлении 0,01 МПа доля равна 0,2, а при давлении 0,001 МПа уже 0,045. Это показывает, что при малых парциальных давлениях (меньше 0,001 МПа) для оценок можно использовать соотношения (2.39)–(2.40). В противном случае необходимо использовать диффузионное приближение для радиационного переноса тепла. Аналитическое решение для лучистого потока в щели заполненной непрозрачным газом (рисунок 2.2) представлено в [76].

Постановка задачи о теплообмене излучением в оптически плотном газе между двумя бесконечными плоско-параллельными поверхностями приведена на рисунке 2.2. На нижней

задаётся температура T_1 , на верхней – T_2 . Расстояние между поверхностями D , степени черноты: $\varepsilon_1, \varepsilon_2$.

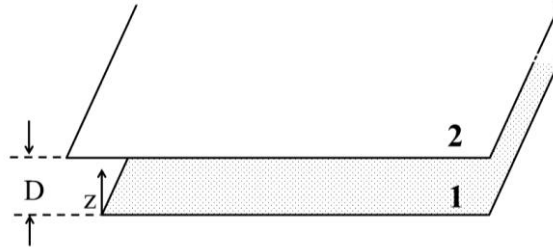


Рисунок 2.2 – Постановка задачи теплообмена излучением в плоском слое газа

Аналитическое решение для нормированного потока тепла между пластинами:

$$q_1 = \psi \cdot \varepsilon_1 \cdot \sigma_B \cdot (T_1^4 - T_2^4), \quad (2.44)$$

$$\psi = \frac{1 + E_1}{(3aD/4) + E_1 + E_2 + 1}. \quad (2.45)$$

Здесь a – коэффициент поглощения газа. Величины E_k :

$$E_k = \frac{1 - \varepsilon_k}{\varepsilon_k} = \frac{1}{\varepsilon_k} - 1, \quad k = 1, 2.$$

При нулевом поглощении формулы (2.44)–(2.45) переходят в (2.37).

Распределение температуры в газовом слое рассчитывается по соотношениям:

$$T^4(z) = T_2^4 + \varphi(z) \cdot (T_1^4 - T_2^4), \quad (2.46)$$

где

$$\varphi(z) = \frac{\psi}{(1 + E_1)} \left(\frac{3 \cdot a}{4} \cdot (D - z) + E_2 + \frac{1}{2} \right).$$

2.3 Моделирование процессов, протекающих в твэле

Объектом моделирования твэльного модуля интегрального кода ЕВКЛИД/V1 является стержневой твэл с таблеточным топливом (диоксид урана, МОКС, мононитридное или смешанное нитридное уран-плутониевое топливо (СНУП)) и газовым подслоем [6, 42].

Основными рассчитываемыми твэльным модулем величинами являются поля температуры в твэле (топливо, оболочка, газовый зазор), параметры, характеризующие эволюцию напряженно-деформированного состояния топлива и оболочки твэла (радиальные,

окружные и осевые напряжения в оболочке и топливной таблетке), момент времени и причина разгерметизации твэла, момент (время) наступления механического взаимодействия топлива и оболочки (МВТО), распухание топлива, изменение внешнего диаметра оболочки твэла, состав продуктов деления в топливе и газовом зазоре.

При моделировании обеспечивается расчёт следующих основных процессов:

- перенос тепла в твэле;
- эволюция напряженно-деформированного состояния топлива и оболочки;
- выход продуктов деления (ПД) в свободный объём под оболочку твэла при облучении топлива.

В твэльном модуле реализовано две версии моделей, отвечающих за описание поведения топлива: инженерная, в которой выход газообразных продуктов деления из топлива и распухание топлива определяются по эмпирическим корреляциям, и усовершенствованная (соответствующий подмодуль получил наименование MFPR), в которой моделируются следующие процессы:

- наработка ПД [77];
- перенос ПД внутри топлива и выход в открытую пористость [78–80];
- усадка технологической пористости на начальных этапах облучения [81];
- формирование и развитие газонаполненной пористости [82, 83];
- взаимодействие ПД внутри топливных зерен с точечными и протяженными дефектами кристаллической решетки, а также эволюция дефектной структуры решетки [84];
- внутризеренный и межзеренный транспорт химически активных ПД и кислорода/азота с учётом перераспределения продуктов деления по молекулярным и фазовым состояниям, включая образование твёрдых фаз (преципитатов) в межзеренной области [80];
- радиоактивные взаимопревращения ПД одновременно с процессами переноса [77].

Модели усовершенствованной версии можно найти в перечисленных выше публикациях, и в данной диссертационной работе они не приводятся.

Одна из двух версий (опций) моделей может быть активирована через файл ввода входных данных интегрального программного комплекса ЕВКЛИД/V1, в котором задаются исходные данные для выполнения расчётов. При этом инженерную опцию рекомендуется использовать только в диапазонах режимных параметров, в которых были получены реализованные в модуле корреляции (они будут описаны ниже).

Моделирование процесса переноса тепла в твэле реализовано путём решения уравнения теплопроводности в цилиндрической системе координат в приближении осевой симметрии

температурного поля. В каждой осевой ячейке решается одномерное уравнение теплопроводности:

$$c_p(T, r) \cdot \rho_{\text{rod}}(T, r) \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r \cdot \lambda_{\text{rod}}(T, r) \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right) + Q_{\text{rod}}(r, t) \quad (2.47)$$

где $0 \leq r \leq R_{\text{ext}}$ – координата, м; $T(r, t)$ – температура, К; $c_p(T, r)$ – удельная теплоёмкость при постоянном давлении, Дж/кг/К; $\rho_{\text{rod}}(T, r)$ – плотность материала, кг/м³; $\lambda_{\text{rod}}(T, r)$ – теплопроводность, Вт/м/К; $Q_{\text{rod}}(r, t)$ – плотность источника тепла, Вт/м³; R_{ext} – внешний радиус оболочки, м.

Начальные и граничные условия, реализованные в твэльном модуле интегрального кода ЕВКЛИД/V1, имеют следующий вид:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=R_{\text{int}}} = 0, \quad (2.48)$$

$$T(r, t)|_{t=0} = T_1(r), \quad (2.49)$$

где R_{int} – внутренний радиус, м; функция T_1 задаётся пользователем, К. На внешней границе может быть задано граничное условие первого, второго или третьего рода.

При решении (2.47) учитываются:

- зависимость теплофизических свойств материалов твэла от температуры;
- деградация теплопроводности топлива с выгоранием;
- изменение толщины и теплопроводности зазора между топливом и оболочкой из-за выхода ПД; при этом предполагается, что смесь в зазоре может состоять из гелия, аргона, ксенона и/или криптона, которые дают наибольший вклад в общую теплопроводность;
- возникновение контактной теплопроводности между топливом и оболочкой при исчезновении зазора;
- радиационный поток тепла при отсутствии контакта топливо–оболочка.

Анализ условий работы твэлов реакторных установок на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем позволяет выделить следующие физические процессы и воздействия, которые учитываются при моделировании механического поведения твэла:

- деформации термической и радиационной ползучести, термические, упругие, деформации, связанные с доспеканием/распуханием топлива;
- зависимость от внешних условий и деградацию под облучением физико-механических свойств материалов твэлов реакторных установок на быстрых нейтронах;
- в качестве силовых факторов учитываются газовое давление под оболочкой и давление теплоносителя, механическое взаимодействие топлива и оболочки (МВТО),

радиальная неоднородность температуры и распухания;

- растрескивание и залечивание трещин в топливе.

При анализе механического поведения твэла в модуле деформационного поведения топлива и оболочки используются следующие допущения:

- радиальное разбиение таблетки и оболочки на цилиндрические слои индивидуально для каждой осевой ячейки;
- соседние осевые ячейки деформируются независимо друг от друга, взаимное влияние осевых ячеек осуществляется через общее газовое давление под оболочкой, то есть реализован, так называемый, 1,5D подход;
- температура, приложенные нагрузки, возникшее напряженно-деформированное состояние произвольного цилиндрического слоя не меняются по высоте и толщине слоя;
- каждая осевая ячейка деформируется в условиях обобщённой плоской деформации;
- газообразные продукты деления, вышедшие под оболочку из топливных таблеток, подчиняются закону идеального газа.

Для определения НДС произвольной осевой ячейки используются следующие соотношения:

- уравнения статического равновесия Навье;
- кинематические соотношения в виде условий совместности перемещений и деформаций Коши или в виде условий совместности деформаций Сен-Венана;
- уравнения, связывающие напряжения и деформации.

Каждый цилиндрический слой (ЦС) характеризуется:

- геометрическими размерами (толщина, средний радиус и высота) при начальной температуре (при которой производится измерение размеров твэла или топливной таблетки после изготовления), смотреть рисунок 2.3;
- приложенными к ЦС нагрузками (в обобщённом смысле) – температура, давления (межслойные и осевое), доспекание/распухание.

В исходном состоянии (отвечающем состоянию твэла сразу после изготовления оболочки твэла) цилиндрические слои, на которые разбита оболочка, имеют одинаковую высоту и согласующиеся радиусы при комнатной температуре: внешний радиус i -го слоя равен внутреннему радиусу $(i+1)$ -го слоя. Аналогичное утверждение справедливо и для топливных таблеток. Будем называть такое состояние слоев разгруженным, а размеры, соответствующие этому состоянию, будем обозначать строчными символами.

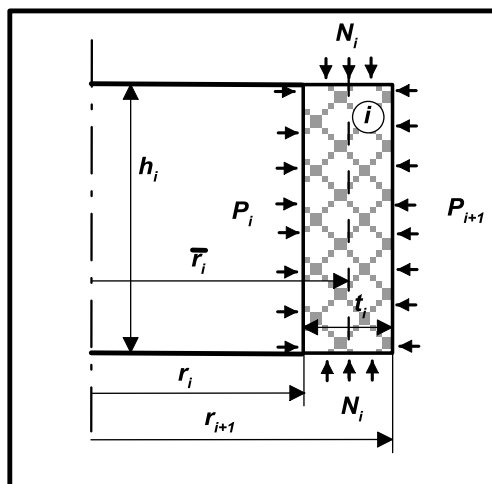


Рисунок 2.3 – Цилиндрический слой: геометрические размеры и давления

В процессе изготовления твэла и его последующей эксплуатации он подвергается различным воздействиям: избыточное внутреннее давление газа-наполнителя, давление теплоносителя, нагрев, облучение. Поскольку воздействия на каждый ЦС оболочки или таблетки различаются, то размеры слоев под нагрузкой перестают быть согласованными: высоты перестают быть равными, а радиусы начинают перекрываться или между ЦС возникают зазоры. Вместе с тем, на практике такого не наблюдается. Для того чтобы сделать высоты одинаковыми, а радиусы согласованными надо приложить межслойные и осевые давления, которые отсутствовали до приложения нагрузок. Эти давления и приводят к возникновению напряжений и деформаций. Такое состояние ЦС под действием нагрузок будем называть нагруженным, а соответствующие величины обозначать прописными символами.

Рассмотрим условия равновесия элемента i -го ЦС единичной высоты, выделенного двумя плоскостями под небольшим углом θ , проходящими через вертикальную ось ячейки. Рассмотрим равновесие не в дифференциальной, а в конечной форме. Тогда равновесие в радиальном направлении приведет к выражению для окружного (тангенциального, азимутального) напряжения:

$$\sigma_{\theta,i} = \frac{P_i \cdot r_i - P_{i+1} \cdot r_{i+1}}{t_i}. \quad (2.50)$$

где $\sigma_{\theta,i}$ – напряжение, Па; P_i , P_{i+1} – внутреннее и внешнее межслойное давление соответственно, Па; r_i , r_{i+1} – внутренний и внешний радиус слоя соответственно, м; t_i – толщина слоя, м; i – номер элементарного слоя.

Рассматривая условие равновесия в осевом (вертикальном) направлении, получим выражение для осевого напряжения:

$$\sigma_{z,i} = -N_i. \quad (2.51)$$

где N_i – осевое давление, Па.

Поскольку пластические деформации зависят от компонент девиатора напряжений, то обнуление одного из напряжений может вызвать слишком большие пластические деформации. Особенно заметно это проявляется при гидростатическом (всестороннем) сжатии. Чтобы избежать этого, радиальные напряжения определим таким образом, что при гидростатическом сжатии все напряжения по величине равны внешнему давлению. Это даёт возможность продолжать расчёт механического поведения вплоть до температуры плавления. Радиальное напряжение определяется следующим образом:

$$\sigma_{r,i} = -\frac{1}{2}(P_i + P_{i+1}). \quad (2.52)$$

Поскольку предполагается, что приложенные к слою нагрузки (температура, давления, распухание) не меняются ни в осевом, ни в окружном направлениях, то касательные напряжения не возникают. Это означает, что нормальные напряжения в (2.50)–(2.52) и соответствующие им нормальные деформации являются главными, и что форма слоя не искажается, то есть меняются лишь размеры. Тогда, считая деформации малыми по сравнению с единицей, можно записать размеры тонкостенного цилиндрического i -го слоя под нагрузкой через разгруженные размеры:

$$Th_i = t_i \cdot (1 + \varepsilon_{r,i}^{\text{tot}}), \quad (2.53)$$

$$\bar{R}_i = \bar{r}_i \cdot (1 + \varepsilon_{\theta,i}^{\text{tot}}), \quad (2.54)$$

$$H_i = h_i \cdot (1 + \varepsilon_{z,i}^{\text{tot}}), \quad (2.55)$$

где $\bar{R}_i$ – средний радиус слоя, м; H_i – высота слоя, м; Th_i – толщина слоя, м; $\varepsilon_{r,i}^{\text{tot}}$, $\varepsilon_{\theta,i}^{\text{tot}}$, $\varepsilon_{z,i}^{\text{tot}}$ – суммарная деформация i -го слоя в радиальном, окружном и осевом направлении цилиндрической системы координат соответственно.

Рассмотрим условие неразрывности перемещений не в дифференциальной, а в конечной форме. Как уже говорилось выше, для произвольной осевой ячейки это сводится к равенству высот всех ЦС под нагрузкой и согласование радиусов всех ЦС также под нагрузкой. Очевидно, что если число ЦС равно N , то можно записать $(N-1)$ независимое уравнение для равенства высот соседних слоев под нагрузкой, рисунок 2.4:

$$H_i = H_{i+1}, \quad i=1, N-1. \quad (2.56)$$

Для радиусов соседних слоев также можно записать (N-1) независимое уравнение для равенства под нагрузкой, рисунок 2.4:

$$\bar{R}_i + 0,5 \cdot Th_i = \bar{R}_{i+1} - 0,5 \cdot Th_{i+1}, \quad i=1, N-1. \quad (2.57)$$

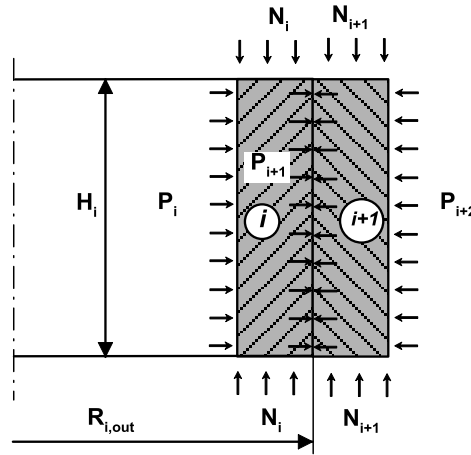


Рисунок 2.4 – Соседние слои i и i+1 под нагрузкой

При наличии зазора «топливо–оболочка» и числе слоев равном N для оболочки неизвестными будут (N-1) межслойное давление (газовое давление под оболочкой твэла и давление теплоносителя известны) и N осевых давлений. Таким образом, число неизвестных, которыми являются межслойные и осевые давления, равно $(2N - 1)$.

Последнее замыкающее уравнение для определения неизвестных получается из рассмотрения условий равновесия фрагмента оболочки (полученного рассечением твэла плоскостью, перпендикулярной оси симметрии) в осевом направлении.

Для формирования системы уравнений относительно неизвестных давлений запишем (N-1) уравнение вида (2.56) и (2.57) для каждой пары соседних слоев, подставим в них выражения через деформации (2.53)–(2.55).

Суммарная деформация i-го ЦС в произвольном направлении складывается из отдельных компонент:

$$\varepsilon_{\chi,i}^{\text{tot}} = \varepsilon_{\chi,i}^e + \varepsilon_{\chi,i}^T + d\varepsilon_{\chi,i}^{\text{cr}} + \varepsilon_{\chi,i}^{\text{sw}} \quad (2.58)$$

где $\varepsilon_{\chi,i}^e, \varepsilon_{\chi,i}^T, d\varepsilon_{\chi,i}^{\text{cr}}, \varepsilon_{\chi,i}^{\text{sw}}$ – деформация упругости, температурная, приращение суммарной деформации ползучести и деформация, обусловленная доспеканием/распуханием, соответственно; индекс $\chi = r, \theta, z$ соответствует осям цилиндрической системы координат.

Из суммарной деформации (2.58) только упругие и деформации ползучести зависят от напряжений. Выразив эти деформации через физические законы, связывающие напряжения и деформации (например, для упругих деформаций это закон Гука), и, выразив напряжения через неизвестные давления (2.50)–(2.52), получим систему из $2 \cdot (N-1)$ нелинейных алгебраических уравнений относительно неизвестных давлений. Добавив к этой системе последнее уравнение равновесия, получим замкнутую систему уравнений. В качестве начального приближения используется упругое решение.

Такая же система уравнений может быть записана и для топливной таблетки. При отсутствии центрального отверстия в таблетке система дополняется ещё одним уравнением – равенство нулю внутреннего радиуса центрального слоя.

Таким образом, при наличии зазора «топливо–оболочка» НДС таблетки и оболочки определяются независимо друг от друга. При возникновении МВТО объект моделирования представляет собой структуру, состоящую из суммарного числа слоев (число слоев таблетки плюс число слоев оболочки). При этом к системе добавляется еще одно неизвестное – контактное давление «таблетка–оболочка».

Возникает задача корректной записи условия контакта. Есть два предельных случая, которые реализованы в коде:

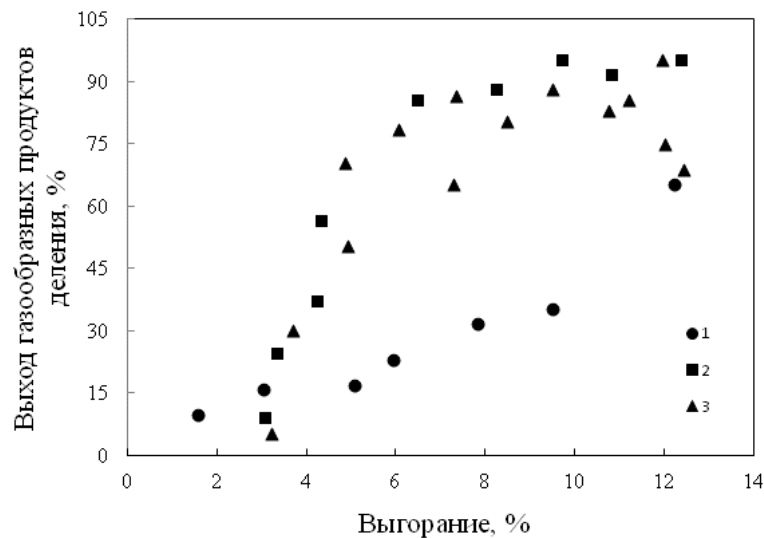
- полное проскальзывание таблетки и оболочки. В этом случае осевые деформации таблетки не приводят к дополнительным осевым напряжениям в таблетке и оболочке;
- полное отсутствие проскальзывания, то есть жесткий контакт таблетки и оболочки, когда осевые деформации таблетки приводят к появлению дополнительных осевых напряжений в таблетке и оболочке.

Для полного проскальзывания «таблетка–оболочка» система уравнений формируется практически из тех же уравнений для оболочки и таблетки, как и до этого, с той лишь разницей, что изменяются уравнения для внешнего слоя таблетки и внутреннего слоя оболочки, поскольку контактное давление является неизвестным, и добавляется еще одно уравнение, выражающее равенство внешнего диаметра таблетки и внутреннего диаметра оболочки под нагрузкой. Поскольку предполагается проскальзывание, то замыкающие уравнения равновесия не меняются и записываются отдельно для таблетки и оболочки.

Для случая жесткого контакта к условию равенства радиусов таблетки и оболочки добавляется условие равенства высот последнего слоя таблетки и первого слоя оболочки. Замыкающее уравнение равновесия незначительно трансформируется, для учёта отсутствия проскальзывания.

После определения НДС всех осевых ячеек твэла прогнозируется механическое состояние оболочки твэла, возможность и причины разгерметизации.

Перейдём к описанию инженерных моделей, отвечающих за описание поведения топлива в твэльном модуле интегрального программного комплекса ЕВКЛИД/V1. Для быстрых реакторов экспериментальные данные по выходу газообразных продуктов деления из топлива UO_2 , PuO_2 , UPuO_2 в зависимости от выгорания в топливе представлены на рисунке 2.5 [85]. Эти значения и используются в твэльном модуле интегрального кода.



1 – PuO_2 , 2 – UO_2 , 3 – UPuO_2

Рисунок 2.5 – Газовыделение из оксидного топлива по результатам послереакторных исследований твэлов реакторов БР-10, БОР-60, БН-350

Для расчёта доли выхода ксенона и криптона из нитридного топлива (в % от наработки) используется следующая эмпирическая зависимость:

$$R = \frac{100}{\exp^{0,0025 \left(90 - \frac{\gamma^{0,77}}{B^{0,09}} - T \right)} + 1} \quad (2.59)$$

где $\gamma = \rho/\rho_0$; ρ – плотность топлива; ρ_0 – теоретическая плотность; B – выгорание, % т.а.; T – температура, К.

Формула действительна для максимальной температуры топлива менее 2000 К и выгораний ≤ 5 % т.а. При более высоких выгораниях принимается максимальная величина

газовыделения – 50 %. При более высоких температурах принимается величина газовыделения – 70 %. Выход других ГПД в инженерных моделях поведения топлива не рассматривается.

2.4 Моделирование нейтронно-физических процессов, протекающих в а.з. реакторных установок на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем

Объектом моделирования является активная зона реакторной установки на быстрых нейтронах с гексагональными сборками [6, 28].

Основным рассчитываемым параметром в интегральном коде является значение мощности реактора (для каждой ТВС) в зависимости от времени.

Нейтронно-физический модуль интегрального программного комплекса ЕВКЛИД/V1 позволяет описывать следующие процессы, протекающие в активной зоне реакторов на быстрых нейтронах:

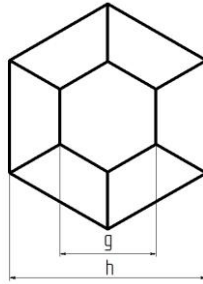
- взаимодействие нейтронов с ядрами среды (топливо, конструкционные материалы, теплоноситель, поглотитель);
- перенос нейтронов в активной зоне;
- размножение нейтронов в активной зоне.

В нейтронно-физическом модуле интегрального программного комплекса ЕВКЛИД/V1 реализовано два метода решения нестационарного уравнения переноса нейтронов: с использованием диффузионного и S_N приближений.

Базовая опция пространственной кинетики нейтронно-физического модуля DN3D основана на решении трёхмерного многогруппового нестационарного уравнения переноса нейтронов в диффузионном приближении с учётом запаздывающих нейтронов [86]. Коэффициенты уравнения (макросечения) зависят от температуры среды, плотности материалов, положения органов регулирования и т.п. Для решения нестационарного уравнения диффузии используется улучшенное квазистатическое приближение [86], основанное на представлении решения в виде произведения $\Phi(\vec{r}, E, t) = P(t)\Psi(\vec{r}, E, t)$ амплитудной функции $P(t)$ и форм-функции $\Psi(\vec{r}, E, t)$.

В модуле DN3D реализованы опции G1 и G7 с одной и семью ячейками на сборку в плане соответственно. В случае использования опции G7 центральная ячейка представляет собой правильный шестигранник, а шесть боковых ячеек являются равнобедренными трапециями (рисунок 2.6). При этом размер «под ключ» центральной ячейки произволен и

может быть индивидуальным для каждой сборки. Данную модель необходимо применять для учёта гетерогенности среды, например, при размещении стержня СУЗ в сборке или в случае большого размера сборки «под ключ», когда становится важным учёт распределения нейтронного потока по поперечному сечению ТВС.



h – размер «под ключ» сборки, g – размер «под ключ» центральной ячейки

Рисунок 2.6 – Пространственное расчётное разбиение G7

При решении нестационарной задачи используются два приближения:

- адиабатическое приближение;
- улучшенное квазистатическое приближение.

Для случая восьмигруппового представления запаздывающих нейтронов, постоянные распада групп предшественников запаздывающих нейтронов не зависят от номера делящегося изотопа.

Опция нейтронно-физического модуля DN3D для учёта углового распределения поля нейтронов, то есть решение задачи переноса нейтронов в S_N приближении, предназначена для моделирования как стационарных, так и нестационарных нейтронно-физических процессов в а.з. реакторов на быстрых нейтронах. В рамках этой опции проводится расчёт пространственно-энергетического распределения плотности потока нейтронов и его функционалов, в частности, в задачах с полостями, большими градиентами поля нейтронов и в задачах с большой степенью ослабления излучений. Данная опция нейтронно-физического модуля основана на S_N методе дискретных ординат. Для учёта анизотропии рассеяния используется P_M приближение полиномами Лежандра. Аппроксимация пространственной зависимости плотности потока нейтронов представлена конечно-разностными алмазными [87] и нодальными [88] схемами с коррекцией плотности потока нейтронов. Энергетическая зависимость учитывается в многогрупповом приближении. Расчёты могут проводиться как в трёхмерной гексагональной,

так и в комбинированной геометрии, что позволяет учесть гетерогенные особенности конкретной расчётной модели.

Для решения задач пространственной кинетики был выбран улучшенный квазистатистический метод. Однако практика расчётов нестационарных режимов, особенно в быстрых реакторах, показала, что определение реактивности по теории возмущения первого порядка может приводить к существенным погрешностям. Поэтому в реализуемом методе реактивность определяется на основе собственных значений однородных задач, описывающих асимптотическое поведение поля нейтронов возмущенного и невозмущенного состояний реактора.

2.5 Базовые модели модуля расчёта выгорания

Объектом моделирования является расчётная ячейка активной зоны РУ.

Результатом расчёта являются значения концентраций актиноидов, продуктов деления и выгорания топлива с учётом всех возможных процессов на рассматриваемых ядрах: деления, захватов нейтронов, распадов (α , β^+ и β^-), в том числе распадов с выбросом нейтрона, реакций $(n,2n)$, $(n,3n)$, спонтанного деления. С учётом энергии делящего нейтрона рассчитываются выходы нуклидов-продуктов деления для каждого из делящихся нуклидов [89].

Для определения концентраций в расчётных ячейках модели реактора применяются цепочки превращений нуклидов в топливном цикле. В качестве входных параметров используются плотность потока нейтронов и сечения взаимодействия нейтронов с веществом в этой ячейке.

Скорость процесса деления для нуклида i λ_{fi}

$$\lambda_{fi} = \frac{1}{V} \int_V \int_E \sigma_{fi}(E, \vec{r}) \varphi(E, \vec{r}) dE dV, \quad (2.60)$$

скорость процесса захвата для i -го нуклида λ_{ci}

$$\lambda_{ci} = \frac{1}{V} \int_V \int_E \sigma_{ci}(E, \vec{r}) \varphi(E, \vec{r}) dE dV, \quad (2.61)$$

где $\sigma_{fi}(E, \vec{r})$, $\sigma_{ci}(E, \vec{r})$ – сечения соответствующих нейтронных реакций; $\varphi(E, \vec{r})$ – энергетическое распределение плотности потока нейтронов.

Аналогично представляются скорости реакций $(n,2n) - \lambda_{n2ni}$, $(n,3n) - \lambda_{n3ni}$, $(n,\alpha) - \lambda_{\alpha i}$ и так далее.

Скорость перехода нуклида «i» в нуклид «j» в процессе распада с периодом полураспада $T_{1/2}^i$ и вероятностью канала данного распада $\varepsilon_{i \rightarrow j}$ ($\sum_j \varepsilon_{i \rightarrow j} = 1$):

$$\lambda^{i \rightarrow j} = \varepsilon_{i \rightarrow j} \ln 2 / T_{1/2}^i. \quad (2.62)$$

Аналогично представляется скорость спонтанного деления.

Данные о микросечениях нуклидов, скоростях распадов и вероятностях процессов берутся из библиотеки данных [90].

На каждом временном интервале Δt все вышеуказанные параметры уравнения выгорания (скорости реакций, плотность потока нейтронов) предполагаются неизменными. На следующем интервале они переопределяются.

При решении задачи выгорания определяются не только концентрации нуклидов на конец временного интервала, но и погрешности этих концентраций, вызванные неопределённостями входных данных: микросечений, распадных данных, выходов продуктов деления и исходных концентраций нуклидов.

2.6 Базовые модели модуля расчёта остаточного энергосодержания

Объектом моделирования является расчётная ячейка активной зоны РУ.

Основным результатом расчёта модуля является мощность остаточного энергосодержания в зависимости от времени.

Модуль OSTB рассчитывает величину остаточного энергосодержания по следующему выражению:

$$W_{ост} = 1,60219 \cdot 10^{-13} \cdot \sum_j \rho_j \lambda_j E_j \quad (2.63)$$

где $W_{ост}$ – остаточное энергосодержание от актиноидов и продуктов деления, Вт; ρ_j – концентрация изотопа j, ядер/см³; λ_j – постоянная распада изотопа j, 1/с; E_j – энергосодержание при распаде изотопа j, МэВ/распад.

В расчётах участвуют все актиноиды (49 изотопов) и продукты деления (1561 изотоп). По цепочкам распада, реализованным в модуле расчёта выгорания, проводится определение концентраций актиноидов и продуктов деления на момент расчёта остаточного энергосодержания T_0 и по формуле (2.63) находится искомая величина. Значения постоянных распада и энергосодержаний при распаде нуклидов берутся из библиотеки БНАБ-93 [91].

2.7 Заключительные и обобщающие замечания по разделу 2

В разделе 2 описаны базовые модели интегрального программного комплекса ЕВКЛИД/V1.

К ключевым особенностям и преимуществам разработанных моделей следует отнести:

- возможность расчёта различных типов теплоносителя (натрий, свинец, свинец-висмут, вода, воздух) и топлива (оксидное, нитридное) на основе апробированных расчётных методик и физических моделей, включающих в себя, в том числе, эмпирические соотношения, полученные на базе уникальных экспериментальных данных по облучению оксидного и нитридного топлива в РУ БН-600 и БОР-60;
- наличие моделей для описания процессов, протекающих при межконтурных течах парогенератора РУ с натриевым и тяжёлым жидкометаллическим теплоносителем;
- наличие наряду с инженерными механистическими моделями, описывающих поведение топлива (то есть физических моделей, описывающих процессы, протекающие в топливе, а не эмпирических корреляций);
- наличие различных приближений для моделирования нейтронно-физических процессов, позволяющих, в частности, учесть распределение поля нейтронов по поперечному сечению ТВС;
- возможность моделирования как свежего, так и выгоревшего топлива.

Течение двухфазной среды в теплогидравлическом модуле интегрального программного комплекса ЕВКЛИД/V1 описывается на основе двухжидкостной модели теплогидравлики, при этом, как и в расчётном коде КОРСАР, в дисперсно-кольцевом режиме течения производится отдельное описание поведения пленки жидкости и взвешенных в газовом ядре капель жидкости. Однако по сравнению со стандартной формой записи уравнений, используемой для водяных теплоносителей, в правую часть уравнения сохранения энергии для жидкой фазы включён поток тепла за счёт продольной теплопроводности, которая существенна только для жидкометаллических теплоносителей, поскольку их теплопроводность примерно на два порядка выше, чем теплопроводность водяного теплоносителя.

Межфазные взаимодействия и взаимодействия со стенкой для натриевого теплоносителя определяются на основе карты, включающей следующие режимы течения: однофазные жидкость и пар, пузырьковый, дисперсно-кольцевой и дисперсный. Замыкающие соотношения, используемые в коде для натриевого теплоносителя, базируются на экспериментальных данных, большая часть которых получена в АО «ГНЦ РФ-ФЭИ». При этом чрезвычайно важным является вопрос о начальном перегреве натрия при вскипании, поскольку

экспериментально зафиксированы перегревы от нуля до сотен градусов. Поскольку значение перегрева зависит от множества режимных и конструктивных факторов, которые сами могут изменяться во времени, выбор начального перегрева приобретает экспертный характер или может рассматриваться как случайная величина. По этой причине в теплогидравлическом модуле интегрального программного комплекса ЕВКЛИД/V1 реализована возможность задания значения перегрева пользователем.

Свинцовый и свинцово-висмутовый теплоносители в достаточно широком диапазоне давлений и температур можно рассматривать как однофазную жидкость. Многофазные состояния этих теплоносителей, обусловленные их вскипанием, в настоящее время в теплогидравлическом модуле интегрального программного комплекса ЕВКЛИД/V1 не моделируются. Однако для моделирования межконтурных течей парогенератора, транспорта неконденсируемых газов в свинцовом теплоносителе и ряда других процессов выделены следующие режимы течения: пузырьковый, снарядный и кольцевой. При этом предполагается, что в рассматриваемых режимах конструкторами реакторных установок будет обеспечено поддержание концентрации кислорода в узком разрешённом диапазоне $(1-4) \cdot 10^{-6}$ мас.%. В этих условиях используются соотношения для расчёта теплообмена, полученные на основе результатов экспериментов, проведённых в АО «ГНЦ РФ-ФЭИ», АО «НПО ЦКТИ», Нижегородском государственном техническом университете и ИТ СО РАН на тяжёлых жидкометаллических теплоносителях. Следует отметить, что в случае отклонения от указанного диапазона пользователь должен самостоятельно оценить толщину оксидной плёнки и ввести поправочные множители к замыкающим соотношениям через файл ввода входных данных (соответствующая возможность в интегральном программном комплексе реализована).

Разработана модель плавления/затвердевания тяжёлого жидкометаллического теплоносителя, в которой изменение толщины слоя твёрдого свинца или свинца-висмута определяется решением задачи Стефана. Для описания теплообмена в газовой подушке реакторов в расчётный код внедрена модель излучения, позволяющая описывать теплообмен между поверхностью расплава и внутренней поверхностью верхней крышки реакторной установки.

Процессы в водяных контурах реакторных установок на быстрых нейтронах описываются на основе карт режимов течения и теплообмена, используемых в расчётном коде КОРСАР, поскольку с их помощью можно описывать все представляющие практический интерес режимы. Используемые замыкающие соотношения базируются на результатах анализа и обобщения выражений, используемых в отечественных и зарубежных расчётных кодах, за исключением соотношения, описывающего трение о стенку, разработанного автором диссертационной работы.

При моделировании ТВЭЛА обеспечивается расчёт следующих основных процессов:

- переноса тепла;
- эволюции напряженно-деформированного состояния топлива и оболочки;
- выхода продуктов деления в свободный объём под оболочку ТВЭЛА при облучении топлива.

Для ТВЭЛЬНОГО МОДУЛЯ разработано две версии моделей, описывающих поведение облучённого топлива при различных режимах работы реактора: инженерная, в которой выход газообразных продуктов деления из топлива и распухание топлива определяются на основе эмпирических корреляций, и усовершенствованная, в которой решается система нелинейных дифференциальных уравнений, сформулированных на основе моделей наиболее важных процессов, описывающих поведение облученного топлива при различных режимах работы реактора:

- наработка ПД;
- перенос ПД внутри топлива и выход в открытую пористость;
- усадка технологической пористости на начальных этапах облучения;
- формирование и развитие газонаполненной пористости;
- взаимодействие ПД внутри топливных зерен с точечными и протяженными дефектами кристаллической решетки, а также эволюция дефектной структуры решетки;
- внутризеренный и межзеренный транспорт химически активных ПД и кислорода/азота с учётом перераспределения продуктов деления по молекулярным и фазовым состояниям, включая образование твёрдых фаз (преципитатов) в межзеренной области;
- радиоактивные взаимопревращения ПД одновременно с процессами переноса.

Базовая опция пространственной кинетики основана на решении трёхмерного многогруппового нестационарного уравнения переноса нейтронов в диффузионном приближении с учётом запаздывающих нейтронов. Коэффициенты уравнения (макросечения) зависят от температур среды, плотности материалов, положения органов регулирования и т.п. Для решения нестационарного уравнения диффузии используется улучшенное квазистатическое приближение. Разработаны алгоритмы решения, использующие одну и семь ячеек на сборку в плане. Опция с семью ячейками на сборку в плане применяется для учёта гетерогенности среды, например, при размещении стержня СУЗ в сборке или в случае большого размера сборки «под ключ», когда становится важным учёт распределения нейтронного потока по поперечному сечению ТВС.

Для учёта углового распределения поля нейтронов как в стационарных, так и в нестационарных режимах используется S_N метод дискретных ординат. Для учёта анизотропии рассеяния используется P_M приближение полиномами Лежандра.

Для расчёта выгорания решается система уравнений нуклидной кинетики с любым уровнем заполнения матрицы преобразования нуклидов. Для определения остаточного энерговыделения по цепочкам распада проводится определение концентраций актиноидов и продуктов деления на момент расчёта остаточного тепловыделения с последующим расчётом остаточного энерговыделения на основе скоростей и энергии распада нуклидов.

3 База данных по свойствам материалов и теплоносителей

3.1 Вводные замечания к разделу 3

При разработке проектов новых реакторных установок особое внимание уделяется получению свойств материалов и теплоносителей во всём возможном диапазоне изменения режимных параметров. Достаточно умеренные неопределённости в значениях ряда свойств могут кардинальным образом отразиться как на безопасности реакторной установки, так и на её технико-экономических показателях. При разработке программных комплексов, в том числе интегральных, встаёт аналогичная задача необходимости обеспечения полноты и комплексности базы данных, которая будет использоваться в расчётах. Пути решения поставленной задачи достаточно очевидны. На первом этапе должен быть определён перечень необходимых материалов и их свойств. Далее должны быть выполнены обобщение и анализ имеющихся данных по свойствам этих материалов. По итогам анализа должны быть обозначены свойства, которые известны достаточно надёжно, а также те, которые требуют дополнительного изучения. Несмотря на то что в последние годы наблюдается значительный прогресс в изучении свойств материалов на основе молекулярно-динамического моделирования, тем не менее до сих пор наиболее надёжным остается экспериментальный метод получения свойств.

В разделе 3 приведено описание базы данных по свойствам материалов, разработанной автором диссертационной работы совместно с к.т.н. Ю.В.Катышковым, д.ф.-м.н., профессором П. Н. Вабищевичем и Н.П.Вабищевичем. Основное внимание в части содержательного наполнения базы данных уделено теплофизическим свойствам жидкометаллических теплоносителей: натрия, свинца и свинца-висмута, для которых были проведены работы по анализу имеющихся данных, а в случае недостаточности данных – сформулированы требования к выполнению экспериментальных измерений, по результатам которых недостающие свойства внесены в базу данных.

Что касается свойств конструкционных материалов и СНУП топлива для реакторных установок на быстрых нейтронах, то соответствующие обобщающие исследования были выполнены в Частном учреждении «ИТЦП «ПРОРЫВ». По их результатам выпущены «Временные руководящие материалы по использованию данных по свойствам конструкционных материалов и СНУП топлива для обоснования работоспособности экспериментальных твэлов ЭТВС реактора БН-600» (вторая редакция) (далее – ВРМ-2). Сформулированные в ВРМ-2 рекомендации реализованы в базе данных. Данные по свойствам материалов твэлов, которые необходимы для выполнения верификационных или прикладных

расчётов, отсутствующие в ВРМ-2, были собраны и обобщены в результате работы, выполненной в АО «ВНИИНМ», НИЦ «Курчатовский институт» и АО «ГНЦ РФ-ФЭИ». Соответствующие результаты опубликованы в виде отчётов [92, 93] и также реализованы в базе данных. Следует отметить, что неполнота имеющихся данных постепенно восполняется в результате выполнения дополнительных экспериментальных исследований в рамках Комплексной программы расчётно-экспериментального обоснования плотного топлива для реакторов на быстрых нейтронах, реализуемой в проектом направлении «Прорыв».

Выше представлена информация о содержательном наполнении базы данных, однако кроме решения вопроса об оценке данных по свойствам материалов, необходимо было разработать саму базу данных, которая должна включать в себя:

- базу данных (совокупность оцененных свойств материалов);
- графический интерфейс пользователя;
- библиотеку для использования свойств материалов в программных комплексах.

Наличие подобной базы данных позволило:

- создать базу знаний по свойствам материалов для реакторных установок на быстрых нейтронах;
- согласовать свойства материалов, используемые в расчётах различными программными комплексами, а также отдельными расчётными модулями интегральных программных комплексов;
- минимизировать ошибки в значениях свойств материалов при выполнении инженерных расчётов и оценок.

Представленные в данном разделе результаты работ опубликованы автором диссертационной работы в статьях [94, 95].

Непосредственно автором диссертационной работы программно реализованы отдельные элементы базы данных по свойствам материалов, осуществлён анализ и оценка теплофизических свойств жидкого свинцового теплоносителя.

По аналогии со вторым разделом, детальные соотношения по свойствам теплоносителей, представленные в диссертационной работе, приведены для целостности изложения материала и возможности их использования при выполнении инженерных расчётов.

3.2 Общие сведения

База данных и её графический интерфейс обладают следующими возможностями [94, 96]:

- использование констант, таблиц и формул в качестве источников данных;
- создание таблиц с заданными параметрами по шагу и пределам изменения аргумента. Сохранение таблиц в различных форматах, в том числе, в XML и в двоичном формате;
- импорт табличных данных в базу данных из текстовых документов;
- возможность создания баз данных пользователя;
- быстрый поиск нужного материала и свойства по идентификатору или наименованию;
- создание и редактирование базы данных (добавление, удаление и редактирование материалов, свойств и данных);
- вывод графика зависимости текущего свойства от аргумента;
- обработка формул парсером (программой чтения и обработки данных), что позволяет отказаться, в подавляющем случае, от написания отдельных функций для каждого уравнения. В качестве парсера был выбран свободно распространяемый обработчик формул «muParser», обладающий высокой скоростью счёта. Использование парсера позволило упростить и ускорить процедуру добавления нового свойства, описываемого формулой;
- реализация наиболее популярных методов аппроксимации дискретных табличных данных формулами: интерполяционный многочлен Лагранжа, метод наименьших квадратов и сплайн;
- расчёт значения текущего свойства с использованием встроенного калькулятора;
- графический анализ свойств, взятых из разных источников;
- вывод на печать базы данных и создаваемых таблиц;
- сортировка всех материалов базы данных на группы, принятые в атомной энергетике: газы, замедлители, защитные материалы, конструкционные материалы, поглощающие материалы, продукты окисления, теплоносители, топливо и элементы.

База данных хранится в XML-файле, что позволяет организовать быстрый обмен данными между различными системами.

Схему базы данных можно разделить на 3 основных уровня иерархии. Первый уровень – это уровень материала, содержащий все его необходимые параметры: наименование, уникальный идентификатор в пределах всей базы данных, группа, к которой относится материал, а также комментарий, который содержит, как правило, основные свойства материала при нормальных условиях.

Второй уровень – это уровень свойства, являющийся подуровнем материала. Включает в себя такие сведения по свойству как наименование, идентификатор, уникальный в пределах таблицы свойств текущего материала, тип данных (таблица или формула), а также формульная зависимость текущего свойства от аргумента(ов).

Третий уровень – уровень данных, являющийся подуровнем свойства. Он содержит всего два параметра и предназначен для хранения данных по текущему свойству. Для таблиц такими данными являются значение аргумента и значение свойства, для формул – формальное представление и значения коэффициентов в уравнении.

Основное меню графического интерфейса пользователя базы данных по свойствам материалов включает в себя следующие пункты (рисунок 3.1):

- Файлы – содержит стандартные операции по работе с файлами, а также пункты по установке режима работы, печати и экспорта базы данных;
- Редактирование – обладает полным набором функций по редактированию единой базы данных;
- Сервис – вывод графика зависимости текущего свойства от аргумента. Создание таблиц с заданными параметрами для всех материалов, кроме воды;
- Свойства воды – создание таблиц с заданными параметрами, определение основных свойств воды и пара в однофазной и двухфазной области с помощью калькуляторов;
- Справка – справочная система базы данных.

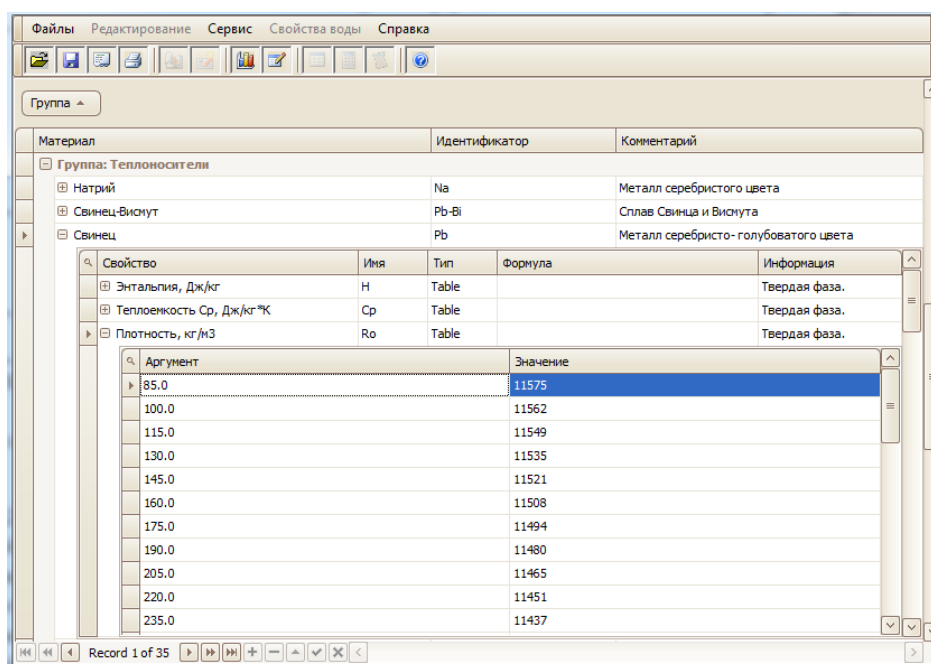


Рисунок 3.1 – Графический интерфейс пользователя базы данных по свойствам материалов

3.3 Правила использования свойств материалов из базы данных в программном модуле

Для использования свойств материалов в расчётном модуле необходимо ввести соответствующие данные в базу данных, сохранить данные, после чего создастся файл SmartDB.xml, в котором хранится вся обобщённая БД. Библиотека расчётных функций mpUniLib, написанная на языке программирования C++ и поставляемая вместе с базой данных, предоставляет инструментарий для расчётных кодов для определения свойств материалов.

Использование библиотеки в расчётных модулях включает в себя 4 этапа:

- Первый этап. Инициализация базы данных, то есть соединение библиотеки mpUniLib с XML-файлом SmartDB.xml, в котором хранится база данных по свойствам материалов и теплоносителей.
- Второй этап. Инициализация всех необходимых данных материалов и свойств, заданных пользователем. На этой стадии создаются указатели. При этом динамически аллокируется память, считывается и сохраняется необходимая информация из XML-файла. Инициализация данных проводится всего один раз в самом начале работы программы. На этой стадии пользователю необходимо задать идентификаторы материалов и свойств, которые берутся из базы данных SmartDB.
- Третий этап. Расчёт значений свойств при заданных параметрах с помощью расчётных функций. В библиотеке имеется 3 расчётные функции для свойств с одним, двумя и тремя аргументами.
- Четвёртый этап. Освобождение памяти, аллокированной для хранения данных.

Расчётные функции библиотеки можно разделить на 4 группы:

- функции инициализации базы данных, а также материалов и свойств, задаваемых пользователем. Вызываются в самом начале работы с базой данных;
- расчётные функции, предназначенные для определения свойств материалов при заданном значении аргумента (аргументов). Используются для одномерных таблиц и формул. Формулы могут иметь от одного до трёх аргументов;
- вспомогательные функции, которые используются для определения допустимых значений аргумента в формуле или таблице, а также для вывода ошибок при инициализации;
- функция удаления указателей и освобождения аллокированной памяти. Вызывается в самом конце работы с базой данной.

Имена функций библиотеки начинаются с двух букв «mp» («material properties»), что означает принадлежность их к библиотеке по расчёту свойств материалов. Информация по расчётным функциям библиотеки представлена в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Список функций библиотеки

Наименование функции	Комментарий
bool mpInitDatabase(const char *fName),	Инициализация базы данных.
MPHandle mpInitMaterial (const char *mID, const char *pID, const char *arg)	Инициализация свойств заданного материала, создания указателей и аллокации памяти.
double mpGetProperty1(MPHandle handle, int index, double arg1)	Расчёт свойства, зависящего от одного аргумента.
double mpGetProperty2(MPHandle handle, int index, double arg1, double arg2)	Расчёт свойства, зависящего от двух аргументов.
double mpGetProperty3(MPHandle handle, int index, double arg1, double arg2, double arg3)	Расчёт свойства, зависящего от трёх аргументов.
double mpGetMin(MPHandle handle, int index, int arg)	Определение минимально допустимого значения аргумента в формуле или таблице.
double mpGetMax(MPHandle handle, int index, int arg)	Определение максимально допустимого значения аргумента.
const char *mpGetError()	Вывод ошибок, возникающих в функциях инициализации.
void mpDeleteMaterial(MPHandle handle)	Удаление указателей и освобождение памяти.

При компиляции библиотеки создаются файлы UniLib.dll и UniLib.lib, которые и используются в программных модулях.

В комплект поставки также входят заголовочные файлы:

- Matlib.h – для программ на C/C++;
- mpUniLib.F90 – для программ на FORTRAN.

Для использования библиотеки mpUniLib в программных модулях на языках программирования C/C++ необходимо:

- поместить файл с базой данных SmartDB.xml в проект или в другое удобное место;
- скопировать заголовочный файл библиотеки matlib.h в директорию проекта и включить его в проект;
- скопировать файлы UniLib.dll и UniLib.lib из директории Debug или Release библиотеки в соответствующую директорию проекта (Debug или Release) в зависимости от предполагаемого режима компилирования программы;

- указать путь доступа к файлу UniLib.lib. В среде MS Visual Studio это надо сделать во вкладке «Project/Properties/Configuration properties/Linker/Input/Additional Dependencies: \$(SolutionDir) useUniLibInC/UniLib.lib»;
- откомпилировать и запустить проект.

Для использования библиотеки mpUniLib в расчётных кодах, написанных на языке программирования FORTRAN, необходимо:

- поместить файл с базой данных SmartDB.xml в проект или в другое удобное место;
- скопировать и включить в проект заранее подготовленный файл mpUniLib.F90, который представляет собой заголовочный файл, в котором содержится объявления всех функций библиотеки mpUniLib. Входит в состав поставки для программ на FORTRAN;
- скопировать файлы UniLib.dll и UniLib.lib из директории Debug или Release источника в соответствующую директорию проекта (Debug или Release) в зависимости от предполагаемого режима компилирования программы;
- указать путь доступа к файлу UniLib.lib. В среде MS Visual Studio это надо сделать во вкладке «Project/Properties/Configuration properties/Linker/Input/Additional Dependencies: \$(SolutionDir) useUniLibInFortran/UniLib.lib».

3.4 Оцененные данные по теплофизическим свойствам жидкого свинцового теплоносителя

Результаты анализа экспериментальных данных по измерению теплофизических свойств жидкого свинцового теплоносителя, опубликованные в работе [95], позволили выделить наиболее надёжные данные. В качестве критериев достоверности применялись следующие параметры: согласование результатов с данными других экспериментальных работ, качественное согласие с известными теоретическими закономерностями, значение погрешностей и тщательность выполненных измерений. Оцененные значения по теплофизическим свойствам жидкого свинцового теплоносителя, полученные в результате выполненного анализа, представлены ниже.

Температура плавления и затвердевания

Температура затвердевания свинца при нормальном давлении взята из [97] и равна $T_{пл} = 600,6 \pm 0,1$ К.

Температура кипения

Температура кипения свинца при нормальном давлении взята из [97] и равна 2021 ± 3 К.

Плотность

Значения плотности жидкого свинца при нормальном давлении взяты из [98] и представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Плотность жидкого свинца

T, K	$\rho, \text{кг/м}^3$									
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
600,6	10640,8	10629,4	10617,9	10606,4	10594,9	10583,3	10571,6	10559,9	10548,2	10536,5
700	10524,7	10512,8	10500,9	10489,0	10477,1	10465,1	10453,1	10441,1	10429,0	10416,9
800	10404,8	10392,6	10380,4	10368,2	10356,0	10343,7	10331,5	10319,2	10306,9	10294,5
900	10282,2	10269,8	10257,4	10245,0	10232,6	10220,2	10207,8	10195,3	10182,9	10170,4
1000	10157,9	10145,5	10133,0	10120,5	10108,0	10095,5	10083,0	10070,5	10058,1	10045,6
1100	10033,1	10020,6	10008,1	9995,7	9983,2	9970,8	9958,3	9945,9	9933,5	9921,1
1200	9908,7	9896,3	9883,9	9871,6	9859,3	9847,0	9834,7	9822,4	9810,2	9798,0
1300	9785,8	9773,6	9761,4	9749,3	9737,2	9725,2	9713,2	9701,2	9689,2	9677,3
1400	9665,4	9653,5	9641,7	9629,9	9618,2	9606,5	9594,8	9583,2	9571,6	9560,1
1500	9548,6	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Данные таблицы 3.2 аппроксимированы выражением:

$$\rho(T) = 11386,34 - 1,219226 \cdot T - 2,064111 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 + 9,212087 \cdot 10^{-9} \cdot T^3. \quad (3.1)$$

Изобарная теплоёмкость

Из [99] взята зависимость изобарной теплоёмкости свинца в жидком состоянии (Дж/(кг К)) от температуры (К) при нормальном давлении (3.2):

$$c_p(T) = (c_1 + c_2 \cdot X^{-2} + c_3 \cdot X + c_4 \cdot X^2 + c_5 \cdot X^3) / M_n. \quad (3.2)$$

где $c_1 = 36,287$; $c_2 = -3,158e-3$; $c_3 = -1,028e2$; $c_4 = 4,113e2$; $c_5 = -4,35e2$; $X = T/10000$; M_n = молярная масса, кг/моль. Они используются в диапазоне температур 600,6–2021 К.

Теплопроводность

Выбору значения теплопроводности для свинцового теплоносителя уделялось повышенное внимание. Анализ, опубликованный в [95], не содержал результатов экспериментальных измерений теплопроводности, выполненных несколько лет назад в проектом направлении «Прорыв» с использованием самых современных экспериментальных

методов. В этой связи в настоящем разделе обоснование выбора рекомендованного соотношения для теплопроводности жидкого свинцового теплоносителя приведено в деталях.

Результаты измерения теплопроводности жидкого свинца приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Результаты измерений теплопроводности жидкого свинца

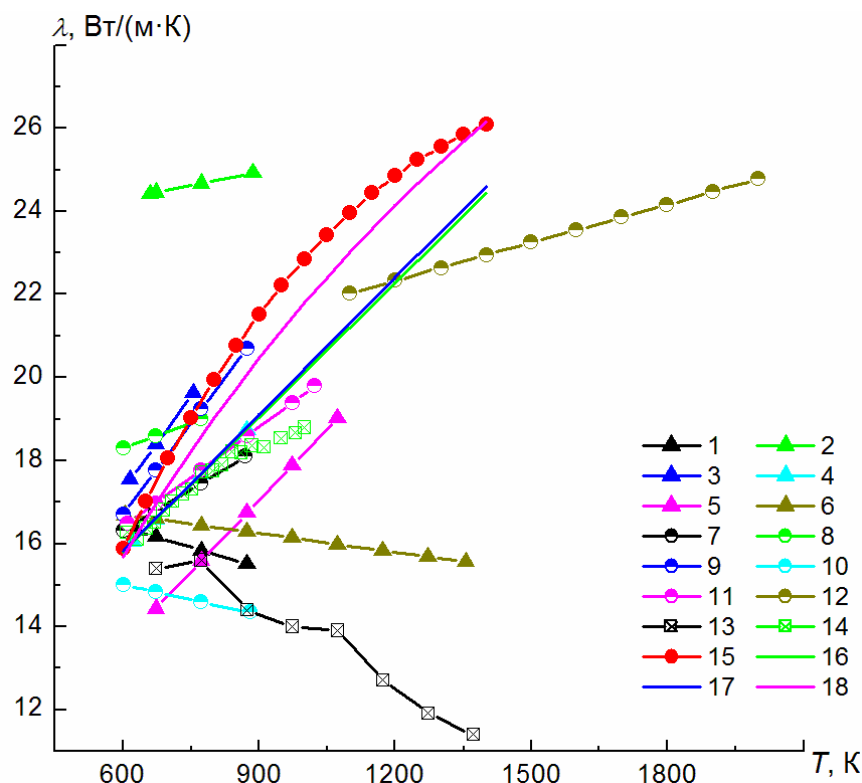
Источник	λ , Вт/[м·К]	Метод
[100]	$3,289 + 0,0274 \times T - 7,87 \times 10^{-6} \times T^2$; [600,6–1300]	N4
[101]	$16,4 + 32,5 \times 10^{-4} (T - 600,4)$; [628–874]	S6
[102]	$24,3 + 21,9 \times 10^{-4} (T - 600,4)$; [659–887]	F
[103]	$17,3 + 151 \times 10^{-4} (T - 600,4)$; [616–755]	S6
[104]	$15,8 + 108 \times 10^{-4} (T - 600,4)$; [623–873]	S6
[105]	$13,6 + 115 \times 10^{-4} (T - 600,4)$; [673–1073]	S5
[106]	$16,7 + 15,2 \times 10^{-4} (T - 600,4)$; [605–1355]	N2
[107]	$16,3 + 66,8 \times 10^{-4} (T - 600,4)$; [601–870]	S6
[108]	$18,3 + 40,6 \times 10^{-4} (T - 600,4)$; [601–773]	S1
[109]	$16,7 + 147 \times 10^{-4} (T - 600,4)$; [601–873]	S6
[110]	$15 - 23,4 \times 10^{-4} (T - 600,4)$; [601–880]	S1
[111]	$16,4 + 80,1 \times 10^{-4} (T - 600,4)$; [612–1024]	K
[112]	$20,5 + 30,6 \times 10^{-4} (T - 600,4)$; [1100–2000]	N2
[113]	$20 - 61,5 \times 10^{-4} T$; [673–1373]	N3
[114]	$11,9 - 71,2 \times 10^{-4} T$; [610–1000]	N3
[115]	$5,673 + 0,0192 \times T - 2,005 \times 10^{-6} T^2$; [600,6–1276]	N4
[116]	$0,0127 \times T + 13,14$, где T – в градусах Цельсия; [600,6–1273]	N4

В таблице обозначения методов измерений заимствованы из [117]:

- S1 – абсолютный стационарный метод осевого потока тепла с активной боковой защитой;

- S2 – абсолютный стационарный метод осевого потока тепла с пассивной боковой защитой;
- S3 – абсолютный стационарный метод осевого потока тепла без боковой защиты;
- S4 – абсолютный стационарный метод радиального потока тепла;
- S5 – метод последовательных стационарных состояний;
- S6 – относительный стационарный метод осевого потока тепла;
- К – модифицированный метод Кольрауша (метод узкой перемычки между массивными блоками);
- F – метод Форбса;
- N1 – нестационарный метод продольных температурных волн;
- N2 – нестационарный метод радиальных температурных волн;
- N3 – нестационарный метод нагретой нити;
- N4 – нестационарный импульсный метод.

Для того чтобы оценить степень несоответствия различных данных из таблицы 3.3 друг другу, они представлены на рисунке 3.2. Кроме экспериментальных данных на рисунке также приведены рекомендации МАГАТЭ и ОЭСР по значениям теплопроводности свинцового теплоносителя. Следует отметить, что данные рекомендации сформулированы на базе [97]: «попытки найти компромисс между доступными экспериментальными данными и законом Видемана–Франца», при этом при анализе экспериментальных данных анализировались результаты экспериментальных исследований, представленные выше, без учёта полученных в 2011 и 2013 годах в России результатах измерений теплопроводности свинца, о которых будет сказано ниже.



1 – [101], 2 – [102], 3 – [103], 4 – [104], 5 – [105], 6 – [106], 7 – [107], 8 – [108], 9 – [109], 10 – [110], 11 – [111], 12 – [112], 13 – [113], 14 – [114], 15 – [100], 16 – [118], 17 – [97, 119], 18 – расчёт по закону Видемана–Франца

Рисунок 3.2 – Экспериментальные данные по теплопроводности свинца

Справочник [120], подготовленный организацией – научным руководителем проектов реакторных установок на быстрых нейтронах АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», ссылается на работу [104], измерения в которой выполнены лишь в диапазоне температур от 623 до 873 К в 1957 г. методом осевого потока тепла, имеющим значительную погрешность.

В 2011 [100] и 2013 годах [115, 116] независимо в ИТ СО РАН и НИЯУ МИФИ были выполнены измерения теплопроводности свинца для марок С0 [100, 115] и С1 [116] в диапазонах температур от 601 К до 1273 К [116], 1276 [100] и 1500 К [115]. Полученные результаты экспериментальных измерений показаны на рисунке 3.3: синие квадраты – [115], красные кружки – [100], зелёные треугольники – [116]. Видно, что максимальное отклонение результатов друг от друга не превышает нескольких процентов.

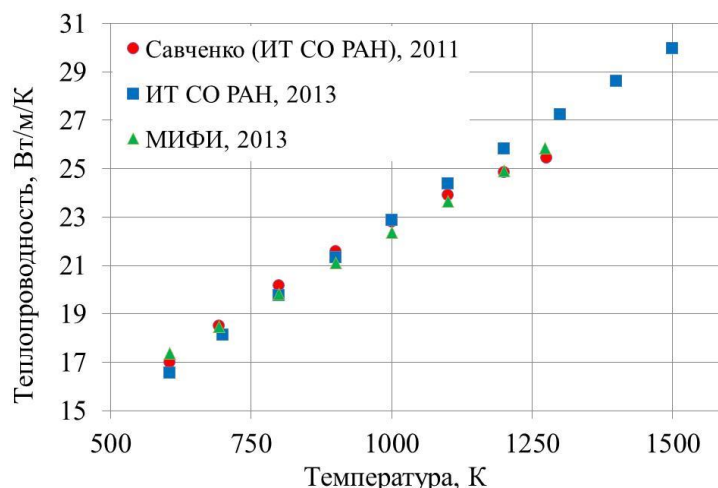


Рисунок 3.3 – Сравнение результатов экспериментальных измерений теплопроводности свинца, выполненных в 2011 [100] и 2013 [115, 116] годах в ИТ СО РАН и НИЯУ МИФИ

На основе всего вышесказанного, автором диссертационной работы рекомендуется использовать данные по теплопроводности свинца в жидком состоянии при нормальном давлении из [100] (эти значения реализованы в базе данных по свойствам материалов и теплоносителей и используются в коде ЕВКЛИД/V1 по умолчанию):

$$\lambda(T) = 3,289 + 0,0274 \cdot T - 7,87 \cdot 10^{-6} \cdot T^2. \quad (3.3)$$

Данные получены для температур 601–1276 К.

Данные работы [100] выбраны, поскольку:

- для измерений использовался метод, ранее не применявшийся для исследования жидких металлов, и новейшая экспериментальная техника. Экспериментаторами выполнен анализ возможных экспериментальных ошибок, на основании которого приняты меры для их устранения и выполнен анализ измерительных погрешностей. Используемая измерительная методика аттестована в ГСССД [121] для применения к жидким металлам и проверялась на легкоплавких металлах в жидком состоянии. Сопоставление полученных результатов с литературными данными по теплопроводности ртути, индия, олова и висмута показало хорошее согласие с результатами наиболее качественно выполненных работ;
- в работах [122, 123] показано, что закон Видемана–Франца [$\lambda = L\sigma T$] позволяет с удовлетворительной точностью (10 %) рассчитывать коэффициент теплопроводности жидких металлов по данным об их электропроводности. Из таблицы 3.3 можно сделать вывод, что данные большинства работ существенно отклоняются от значений, полученных по этому закону. Результаты [100] хорошо согласуются с рассчитанными таким образом значениями в

пределах оцененных погрешностей. Кроме того, поскольку закон Видемана–Франца справедлив лишь для компоненты теплопроводности, обусловленной переносом тепла электронами, незначительное превышение значений, полученных по этому закону, свидетельствует лишь о наличии иных механизмов переноса тепла в жидком свинце;

– полученные по зависимости (3.3) результаты в пределах погрешности измерений согласуются с данными работы [116] по исследованию теплопроводность свинца С1, который планируется применять в РУ БРЕСТ-ОД-300. В работе [116] использовался современный метод импульсного нагрева, который позволяет сделать вывод о высокой точности полученных результатов.

Динамическая вязкость

Из [119] взята зависимость динамической вязкости свинца в жидком состоянии (Па с) от температуры (К) при нормальном давлении (3.4):

$$\mu(T) = 4,55 \cdot 10^{-4} \cdot \exp\left(\frac{1069}{T}\right). \quad (3.4)$$

Область применимости зависимости (3.4): 600,6–1470 К.

Энтальпия плавления

Энтальпия плавления свинца взята из [124] и равна $4,812 \pm 0,04$ кДж/моль.

Скачок плотности при плавлении и кристаллизации

Значение скачка плотности при плавлении и кристаллизации свинца взято из [125] и равно $3,3 \pm 0,25$ %.

Энтальпия испарения

Энтальпия испарения свинца при температуре кипения взята из [119] и равна $177,8 \pm 0,04$ кДж/моль.

Давление насыщенных паров

Значения давления насыщенных паров жидкого свинца взяты из [126] и представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Давление насыщенных паров жидкого свинца

T, К	600,6	700	800	900	1000	1100	1200
P _s , Па	4,3063·10 ⁻⁷	9,59918·10 ⁻⁵	0,00543	0,1199	1,48	11,2	59,6
T, К	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900
P _s , Па	249,3	823,9	2346,5	5799,5	12852,2	26131,1	49595,8

Данные таблицы 3.4 аппроксимированы выражением:

$$\lg(P_s) = 15,78397 - \frac{10330,87}{T} + 0,0001545 \cdot T - 1,81309 \cdot \lg(T). \quad (3.5)$$

Поверхностное натяжение

Значения поверхностного натяжения свинца взяты из [126] и представлены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Поверхностное натяжение свинца

T, К	σ, мН/м
623	448,166
673	443,859
723	439,51
773	435,245

Данные таблицы 3.5 аппроксимированы выражением:

$$\sigma(T) = 0,50183237 - 0,08614 \cdot 10^{-3} T. \quad (3.6)$$

Коэффициент объёмного термического расширения

Значения коэффициента объёмного термического расширения жидкого свинца взяты из [119] и представлены в таблице 3.6.

Данные таблицы 3.7 аппроксимированы выражением:

$$c(T) = 1921,79 - 0,12464 \cdot T - 0,07298 \cdot 10^{-3} \cdot T^2. \quad (3.8)$$

3.5 Теплофизические свойства натриевого теплоносителя

Уравнение состояния на линии насыщения

Для расчёта теплофизических свойств на линии насыщения (энтальпии, плотности, вязкости, теплопроводности, поверхностного натяжения и давления) в базе данных по свойствам материалов используются аппроксимационные формулы, взятые из [128].

Ниже приведены используемые соотношения для натрия в жидком и газообразном состоянии на линии насыщения.

Энтальпия жидкости в диапазоне $371 \text{ K} < T < 2000 \text{ K}$ относительно энтальпии твёрдого натрия при $T = 298,15 \text{ K}$:

$$h_{fs}(T) - h_s(298,15) = 10^3(-365,77 + 1,6582 \cdot T - 4,2375 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 + 1,4847 \cdot 10^{-7} \cdot T^3 + 2992,6 \cdot T^{-1}). \quad (3.9)$$

Энтальпия жидкости в диапазоне $2000 \text{ K} < T < 2500 \text{ K}$:

$$h_{fs}(T) - h_s(298,15) = 10^3(2128,4 + 0,86496 \cdot T - 0,5 \cdot \Delta h_v), \quad (3.10)$$

где энтальпия испарения вычисляется как $\Delta h_v = 10^3(393,37 \cdot (1 - T/T_c) + 4398,6 \cdot (1 - T/T_c)^{0,29302})$, $T_c = 2503,7 \text{ K}$.

Энтальпия пара в диапазоне $371 \text{ K} < T < 2000 \text{ K}$:

$$h_{vs}(T) = h_f(T) + \Delta h_v \quad (3.11)$$

Энтальпия пара в диапазоне $2000 \text{ K} \leq T < 2500 \text{ K}$:

$$h_{vs}(T) = 2128,4 + 0,86496 \cdot T + 0,5 \cdot \Delta h_v \quad (3.12)$$

Давление на линии насыщения:

$$P_s(T) = 10^6 \cdot \exp(11,9463 - \frac{12633,73}{T} - 0,4672 \cdot \ln T). \quad (3.13)$$

Плотность жидкости в диапазоне $371 \text{ K} \leq T \leq 2503 \text{ K}$:

$$\rho_{fs}(T) = (219 + 275,32(1 - T/T_c) + 511,58(1 - T/T_c)^{0,5}). \quad (3.14)$$

Теплопроводность жидкого натрия [128]:

$$\lambda_f(T) = 124,67 - 0,11381 \cdot T + 5,5226 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 - 1,1842 \cdot 10^{-8} \cdot T^3. \quad (3.15)$$

Вязкость жидкого натрия:

$$\mu_f(T) = \exp(-6,4406 - 0,3958 \ln T + 556,835 / T). \quad (3.16)$$

Поверхностное натяжение:

$$\sigma(T) = 240,5 \cdot 10^{-3} \left(1 - \frac{T}{2503,7}\right)^{1,126}. \quad (3.17)$$

Теплопроводность пара натрия [129]:

$$\lambda_v(T) = -0,072 + 2,50 \cdot 10^{-4} \cdot T - 1,73 \cdot 10^{-7} \cdot T^2 + 4,04 \cdot 10^{-11} \cdot T^3. \quad (3.18)$$

Вязкость пара натрия [130]:

$$\mu_v(T) = [208,1 + 0,155(T - 1000)] \cdot 10^{-7}. \quad (3.19)$$

Формулы для динамической вязкости и теплопроводности натрия в жидком и газообразном состояниях не применимы для температур вблизи критической точки ($T \sim 2500\text{K}$).

Уравнение состояния натрия вдали от линии насыщения

Изотермическая сжимаемость определяется согласно выражению:

$$\beta_T = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial P} \right)_T. \quad (3.20)$$

Исходя из значения сжимаемости для жидкого натрия, по порядку величины равного 10^{-10} , расчёт свойств вдали от линии насыщения для жидкого натрия проводится, используя зависимости:

$$\rho_f(P, T) = \rho_{fs}(T)(1 + \beta_T(T)(P - P_s(T))), \quad (3.21)$$

$$h_f(P, T) = h_{fs}(T) + \frac{(1 - T\alpha_p)}{\rho_{fs}} \cdot (P - P_s(T)). \quad (3.22)$$

Здесь α_p – изобарический коэффициент теплового расширения. Значение энтальпии, вычисленной по формуле (3.22) для жидкого натрия вдали от критической точки, незначительно отличается от значения энтальпии на линии насыщения.

Для пара натрия вычисление термодинамических параметров производилось путём разложения по степеням активности, предложенным в работах [131–133] по формулам:

$$\frac{P}{RT} = \zeta + \sum b_j(T) \cdot \zeta^j, \quad (3.23)$$

$$\rho_v = M_{Na}(\zeta + \sum j \cdot b_j(T) \cdot \zeta^j). \quad (3.24)$$

Алгоритм расчёта энтальпии пара вдали от линии насыщения следующий. При $T \leq T^* = 1900$ К определяется давление насыщения при заданной температуре T . После этого значение энтальпии при заданных параметрах P и T вычисляется по следующей формуле, справедливой для $T \leq 1900$:

$$h_v(P, T) = h_{vs}(T) + \frac{R \cdot T}{M_{Na}} \left(\left(\zeta + \sum \frac{d(T \cdot b_j(T))}{dT} \cdot \zeta^j \right)_{P, T} - \left(\zeta + \sum \frac{d(T \cdot b_j(T))}{dT} \cdot \zeta^j \right)_{P_s, T} \right). \quad (3.25)$$

При температуре $T > T^*$ сначала определяется энтальпия при заданном давлении P и температуре T^* , после чего искомое значение определяется по следующей формуле:

$$h_v(P, T) = h_v(P, T^*) + \frac{d}{dT} h_v(P, T^*) \cdot (T - T^*). \quad (3.26)$$

Выражение (3.26) использует приближение идеального газа, то есть:

$$\frac{dh_v}{dT} = \frac{5}{2} M_{Na} R. \quad (3.27)$$

Величина T^* определяется условием равенства производной энтальпии по температуре, рассчитанной по выражению (3.27) с производной, вычисленной в приближении идеального газа.

3.6 Теплофизические свойства жидкого свинцово-висмутового теплоносителя

Температура плавления и затвердевания

Температура затвердевания свинцово-висмутовой эвтектики при нормальном давлении равна $T_{пл} = 398 \pm 1$ К [97].

Температура кипения

Температура кипения свинцово-висмутовой эвтектики при нормальном давлении равна 1927 ± 16 К [97].

Плотность

Значения плотности в пределах температур 400–1273 К и при нормальном давлении аппроксимируются выражением [97]:

$$\rho(T) = 11065 - 1,293 \cdot T. \quad (3.28)$$

Изобарная теплоёмкость

Изобарная теплоёмкость для температур в пределах 400–1100 К определяется по формуле [97]:

$$c_p(T) = 164,8 - 3,94 \cdot 10^{-2} \cdot T + 1,25 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 - 4,56 \cdot 10^{-5} \cdot T^{-2}. \quad (3.29)$$

Теплопроводность

Зависимость теплопроводности свинца-висмута в жидком состоянии от температуры (К) задаётся формулой (3.30) [97], справедливой в диапазоне температур 400–1200 К:

$$\lambda(T) = 3,284 + 1,617 \cdot 10^{-2} \cdot T - 2,305 \cdot 10^{-6} \cdot T^2. \quad (3.30)$$

Динамическая вязкость

Зависимость динамической вязкости свинца-висмута в жидком состоянии от температуры (К) представлена выражением (3.31) [97], справедливым в диапазоне температур 398–1300 К:

$$\eta(T) = 4,94 \cdot 10^{-4} \cdot \exp(754,1/T). \quad (3.31)$$

Энтальпия

Энтальпия свинца-висмута в пределах температур 400–1700 К определяется по формуле [97]:

$$\Delta h = 34,3 \cdot (T - T_{пл}) - 0,41 \cdot 10^{-2} \cdot (T^2 - T_{пл}^2) + 8,667 \cdot 10^{-7} \cdot (T^3 - T_{пл}^3) - 9,5 \cdot 10^4 \frac{(T - T_{пл})}{T \cdot T_{пл}}. \quad (3.32)$$

Скачок плотности при плавлении и кристаллизации

Значение скачка плотности при плавлении свинца-висмута равно +0,5 % [118].

Энтальпия испарения

Энтальпия испарения свинца-висмута при температуре кипения равна 179,2 кДж/моль [118].

Давление насыщенных паров

Давление насыщенных паров в пределах температур 398–2000 К определяется по формуле [97]:

$$P_s(T) = 1,22 \cdot 10^{10} \cdot \exp(-22552/T). \quad (3.33)$$

Поверхностное натяжение

Значения поверхностного натяжения свинца-висмута представлены выражением (3.34) [97], работающим в пределах 400–1400 К:

$$\sigma(T) = (448,5 - 0,0799 \cdot T) \cdot 10^{-3}. \quad (3.34)$$

Коэффициент объёмного термического расширения

Коэффициент объёмного термического расширения в диапазоне температур 400–1500 К определяется соотношением [97]:

$$\beta(T) = 1 / (8558 - T). \quad (3.35)$$

Скорость звука

Скорость звука определяется соотношением (3.36) [97], работающим в пределах 400–1200 К:

$$c(T) = 1855 - 0,212 \cdot T. \quad (3.36)$$

3.7 Теплофизические свойства водяного теплоносителя

Расчёт свойств воды и пара основан на рекомендациях Международной Ассоциации по свойствам воды и пара (International Association for the Properties of Water and Steam) от 1997 г. с дополнениями от 2007 г. (далее сокращённо IAPWS-IF97) [134].

Рекомендации IAPWS-IF97 состоят из набора уравнений для различных расчётных областей, которые в переменных «давление–температура» охватывают следующие пределы аргументов:

- $273,15 \text{ K} \leq T \leq 1073,15 \text{ K}$ при $P \leq 100 \text{ МПа}$;
- $1073,15 \text{ K} \leq T \leq 2273,15 \text{ K}$ при $P \leq 50 \text{ МПа}$.

На рисунке 3.4 показаны 5 областей, на которые разделена вся расчётная область свойств воды и пара в переменных «давление–температура». Границы некоторых областей сразу могут быть определены из рисунка 3.4, границы остальных – специальными уравнениями, приведёнными в рекомендациях.

Свойства в областях 1, 2 и 5 описываются фундаментальным уравнением удельной свободной энергии Гиббса, а в области 3 – уравнением удельной свободной энергии Геймгольца.

Для каждой области и для каждого свойства в рекомендациях приведены расчётные уравнения с соответствующими коэффициентами.

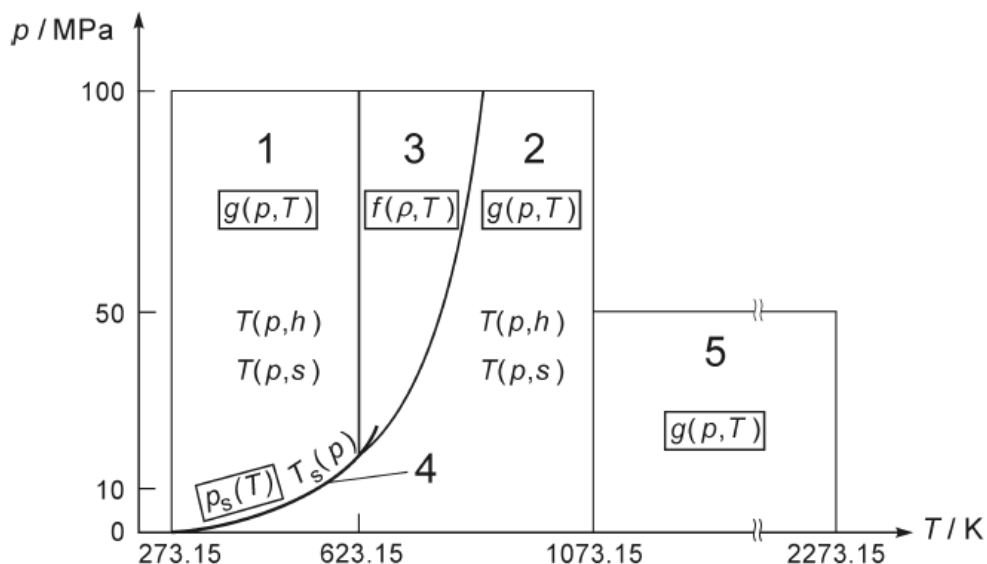


Рисунок 3.4 – Расчётные области для воды и пара

Температура плавления и затвердевания

Температура плавления и затвердевания воды при нормальных условиях составляет 273,16 К. [135].

Температура кипения

Температура кипения воды при нормальных условиях составляет 373,1243 К. [135].

Критические параметры

Температура – 647,096 К.

Давление – 22,064 МПа.

Плотность – 322 кг/м³.

Свойства воды и пара в переменных давление–температура

Как уже указывалось ранее для каждой области и для каждого свойства существует своё достаточно сложное уравнение с большим количеством коэффициентов, доходящим до нескольких сотен. Эти уравнения, программно реализованные в базе данных, можно найти в [134].

3.8 Теплофизические свойства неконденсируемых газов

В базе данных реализованы свойства следующих газов:

- азот (N₂);

- водород (H₂);
- кислород (O₂);
- гелий (He);
- аргон (Ar);
- криптон (Kr);
- ксенон (Xe);
- водяной пар (H₂O, используется только при моделировании поведения пароводяной смеси в тяжёлом жидкометаллическом теплоносителе).

Величины молярных масс и газовых постоянных для неконденсируемых газов из базы данных приведены в таблице 3.8.

Таблица 3.8 – Величины молярных масс и газовых постоянных для неконденсируемых газов

Газ	$M_i \times 10^3$, кг/моль	R_i , Дж/(кг·К)
N ₂	28,013	296,79
H ₂	2,016	4124,3
O ₂	32	259,828
He	4,0026	2077,226
Ar	39,948	208,13
Kr	83,8	99,216
Xe	131,3	265,63
H ₂ O	18,016	461,26

Вязкость газов

Вязкости однокомпонентных газов μ_i , вычисляются по формуле (3.37), предложенной в [136, 137]:

$$\mu_i = \xi_i^{-1} F_{p,i}^0 F_{Q,i}^0 \left[0,807 \cdot T_{r,i}^{0,618} - 0,357 \times \exp(-0,449 T_{r,i}) + 0,340 \exp(-4,058 \cdot T_{r,i}) + 0,018 \right], \quad (3.37)$$

где фактор ξ_i – характеристическая обратная вязкость с размерностью $(\text{Па}\cdot\text{с})^{-1}$ – связан с критическими параметрами, $T_{\text{cr},i}$ и $P_{\text{cr},i}$, и молярной массой M_i соотношением (3.38):

$$\xi_i = 0,37918 \cdot 10^{10} \left(\frac{T_{\text{cr},i}}{M_i^3 \cdot P_{\text{cr},i}^4} \right)^{1/6}, \quad (3.38)$$

$F_{\text{P},i}^0$ и $F_{\text{Q},i}^0$ – безразмерные поправочные множители, введённые для учёта поляризационных и квантовых эффектов;

$T_{\text{r},i}$ – приведённая температура, определяемая как (3.39):

$$T_{\text{r},i} = T_{\text{g}} / T_{\text{cr},i}. \quad (3.39)$$

Критические параметры газов, определённых в базе данных, приведены в таблице 3.9.

Таблица 3.9 – Критические параметры газов

Газ	$T_{\text{cr},i}$, К	$P_{\text{cr},i} \times 10^{-6}$, Па	$V_{\text{cr},i} \times 10^6$, м^3	$1/\xi_i$, $\text{Па}\cdot\text{с}$	$Z_{\text{c},i}$	$d_{\text{r},i}$	Γ_i
N_2	126,25	3,40	92,1	$1,409 \cdot 10^{-5}$	0,29822	0	237,25
H_2	33,24	1,30	65,5	$2,484 \cdot 10^{-6}$	0,30739	0	96,85
O_2	154,78	5,08	78,0	$1,903 \cdot 10^{-5}$	0,30796	0	200,65
He	5,20	0,23	57,5	$1,500 \cdot 10^{-6}$	0,30455	0	318,30
Ar	150,65	4,87	75,2	$2,073 \cdot 10^{-5}$	0,29178	0	229,90
Kr	209,38	5,50	92,3	$3,087 \cdot 10^{-5}$	0,29160	0	323,91
Xe	289,74	5,84	119,5	$3,810 \cdot 10^{-5}$	0,28967	0	411,18
H_2O	647,30	22,12	56,3	0,23139	0,04670	$4 \cdot 10^{-5}$	98,49

Для того чтобы найти фактор $F_{\text{P},i}^0$, требуется приведённый (безразмерный) дипольный момент молекулы, $d_{\text{r},i}$, который определён в [136] как:

$$d_{\text{r},i} = 52,46 \cdot 10^{-5} \cdot d_i^2 \cdot P_{\text{cr},i} / T_{\text{cr},i}^2, \quad (3.40)$$

d_i – дипольный момент молекулы в Д (Дебаях).

Фактор $F_{p,i}^0$ в уравнении (3.37) выражается через приведённую температуру и фактор критической сжимаемости $Z_{c,i}$ и задан соотношением (3.41):

$$F_{p,i}^0 = \begin{cases} 1 & \text{для } d_{r,i} < 0,022 \\ 1 + 30,55(0,292 - Z_{c,i})^{1,72} & \text{для } 0,022 < d_{r,i} < 0,075 \\ 1 + 30,55(0,292 - Z_{c,i})^{1,72} |0,96 + 0,1(T_{r,i} - 07)| & \text{для } 0,075 < d_{r,i} \end{cases} \quad (3.41)$$

Для газов, определённых в базе данных, все d_r – нули (смотреть таблицу 3.9), поэтому $F_{p,i}^0 = 1$ (за исключением водяного пара, при моделировании его транспорта в ТЖМТ).

Фактор $F_{Q,i}^0 = 1$ для всех газов за исключением водорода и гелия. Для H_2 и He он задан формулой (3.42):

$$F_{Q,i}^0 = 1,22 \cdot Q_i^{0,15} \left[1 + 0,00385 \cdot |T_{r,i} - 12|^{2/M_i} \text{sign}(T_{r,i} - 12) \right], \quad (3.42)$$

$$Q(He) = 1,38, \quad Q(H_2) = 0,76, \quad Q(D_2) = 0,52.$$

Значения параметров $Z_{c,i}$ и $d_{r,i}$ приведены в таблице 3.9.

При высоких давлениях, $P \geq P_{cr}$ (и $T_g \geq T_{cr}$), следует учитывать зависимость вязкости от давления, которая описывается формулой (3.43) [138]:

$$\mu_i^p(T, P) = \mu_i(T) \left[1 + Q_i \cdot \frac{A_i \cdot P_{r,i}^{3/2}}{B_i \cdot P_{r,i} + (1 + C_i \cdot P_{r,i}^{D_i})^{-1}} \right], \quad (3.43)$$

где $\mu_i(T)$ – вязкость при низких давлениях для той же температуры, вычисленная из уравнения (3.37), Па·с;

$P_{r,i} = P/P_{cr,i}$ – приведённое давление;

$d_{r,i}$ – приведённый дипольный момент, определённый уравнением (3.40).

В уравнении (3.43) коэффициенты A_i , B_i , C_i , и D_i являются функциями приведённой температуры $T_{r,i}$ и имеют вид (3.44):

$$\begin{aligned} A_i &= \frac{\alpha_1}{T_{r,i}} \exp(\alpha_2 T_{r,i}^a), & B_i &= A_i \exp(\beta_1 T_{r,i}^c - \beta_2) \\ C_i &= \frac{\gamma_1}{T_{r,i}} \exp(\gamma_2 T_{r,i}^c), & D_i &= \frac{\delta_1}{T_{r,i}} \exp(\delta_2 T_{r,i}^d) \end{aligned}, \quad (3.44)$$

где числовые параметры принимают следующие значения:

$$\begin{aligned}\alpha_1 &= 1982,4, & \alpha_2 &= 5,2683, & a &= -0,5767, \\ \beta_1 &= 1,6552, & \beta_2 &= 1,2760, \\ \gamma_1 &= 0,1319, & \gamma_2 &= 3,7035, & c &= -79,8678, \\ \delta_1 &= 2,9496, & \delta_2 &= 2,9190, & d &= -16,6169.\end{aligned}$$

Динамическая вязкость смеси газов вычисляется с помощью метода Wilke [137, 139], согласно которому используется формула (3.45):

$$\mu_{\text{mix}} = \sum_j \frac{x_j \mu_j}{\sum_k x_k \phi_{jk}} = \sum_j \frac{P_j \mu_j}{\sum_k P_k \phi_{jk}}, \quad (3.45)$$

где μ_i , x_i и P_i – соответственно вязкости, мольные доли и парциальные давления компонентов смеси;

функции ϕ_{jk} определяются соотношениями (3.46):

$$\phi_{jk} = \frac{\left[1 + \left(\mu_j / \mu_k \right)^{1/2} \left(M_k / M_j \right)^{1/4} \right]^2}{\left[8 \left(1 + M_j / M_k \right) \right]^{1/2}}, \quad (3.46)$$

и удовлетворяют следующим условиям симметрии (3.47):

$$\phi_{kj} = \left(\mu_k / \mu_j \right) \left(M_j / M_k \right) \phi_{jk}, \quad (3.47)$$

где M_i – молярная масса компонента газовой смеси, кг/моль.

Второе равенство в (3.45) следует из уравнения состояния идеального газа, согласно которому $x_i = P_i / P_{\text{tot}}$, где P_{tot} – полное давление.

Энтальпия смеси газов

Удельная энтальпия h_i неконденсируемого газа i рассчитывается по следующей формуле (3.48) [140]:

$$\begin{aligned}h_i &= M_i^{-1} h_i^{(0)}, \quad \text{Дж/кг} \\ h_i^{(0)} &= b_0 + T_g \cdot (b_1 + b_2 Z^{-2} + b_3 Z^{-1} + b_4 Z + b_5 Z^2 + b_6 Z^3), \quad \text{Дж/моль}\end{aligned} \quad (3.48)$$

где

$$Z = T_g / 10000, \text{ К};$$

T_g – температура газовой фазы, К;

M_{r_i} – молекулярная масса, а.е.м.

Значения констант b_i , $i = 0, \dots, 7$ для газов, свойства которых заданы в базе данных, приведены в таблице 3.10.

Таблица 3.10 – Коэффициенты полиномиального представления энтальпии неконденсируемых газов [140]

	N ₂		O ₂		H ₂	
Tmin	298,15	1200,00	298,15	1500,00	298,15	1800,00
Tmax	1200,00	8800,00	1500,00	4700,00	1800,00	5300,00
b ₀	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
b ₁	27,57	32,86	20,53	33,59	32,24	27,38
b ₂	$-7,89 \cdot 10^{-4}$	0,03	$-1,95 \cdot 10^{-3}$	$7,73 \cdot 10^{-3}$	$1,32 \cdot 10^{-3}$	$2,32 \cdot 10^{-2}$
b ₃	$6,48 \cdot 10^{-2}$	-0,65	0,22	-0,41	-0,13	-0,26
b ₄	-0,69	14,18	134,64	10,58	-44,94	24,06
b ₅	305,29	-19,33	-550,68	3,50	305,79	-20,31
b ₆	-996,49	10,93	941,89	-7,64	-522,35	9,31
	He	Ar	Kr	Xe	H ₂ O (для моделирования распространения водяного пара в ТЖМТ)	
Tmin	298,15	298,15	298,15	298,15	298,15	1600,00
Tmax	20000,00	8200,00	7000,00	5800,00	1600,00	4500,00
b ₀	0,00	0,00	0,00	0,00	-238923,00	-238923,00
b ₁	20,79	20,79	20,79	20,79	29,70	35,38
b ₂	0,00	0,00	0,00	0,00	$-9,46 \cdot 10^{-4}$	$5,92 \cdot 10^{-2}$
b ₃	$-3,46 \cdot 10^{-5}$	$-3,46 \cdot 10^{-5}$	$-3,46 \cdot 10^{-5}$	$-3,46 \cdot 10^{-5}$	$9,66 \cdot 10^{-2}$	-1,09
b ₄	0,00	0,00	0,00	0,00	39,80	63,92

Продолжение таблицы 3.10

	He	Ar	Kr	Xe	Н ₂ О (для моделирования распространения водяного пара в ТЖМТ)	
b ₅	0,00	0,00	0,00	0,00	194,14	–75,90
b ₆	0,00	0,00	0,00	0,00	–549,29	42,07

Для расчёта энтальпии смеси неконденсируемых газов и пара используется аддитивная модель, то есть выражение:

$$h = X_v h_v(P_v, T) + \sum_{n=1}^{N_n} X_n h_n(T). \quad (3.49)$$

Теплопроводность смеси газов

В литературе отсутствуют достаточно надежные корреляционные формулы для теплопроводности основных газов. В базе данных используется соотношение (3.50), полученное путём аппроксимации экспериментальных данных из [129] для He, Ar, Kr, Xe, N₂, N₂, O₂:

$$\lambda_i \times 10^3 = A_i T_g^\alpha + B_i T_g^{-1} + C_i + D_i (T_g/1000) + E_i (T_g/1000)^2. \quad (3.50)$$

При выводе формулы (3.50) использованы данные для He, Ar, Kr, Xe, N₂ в температурном интервале 300–2500 К и для N₂, O₂ – в интервале 300–1500 К; в указанных интервалах температур отклонения от экспериментальных данных не превышают 3 %. Отметим также, что, согласно [129] относительные изменения теплопроводностей рассматриваемых газов с ростом давления до ~10 МПа не превышают 1–2 %.

Формула (3.50) даёт теплопроводность λ_i в единицах Вт/(м·К); значения коэффициентов A_i, B_i, C_i, D_i, E_i приведены в таблице 3.11.

Таблица 3.11 – Коэффициенты корреляционной формулы для теплопроводности неконденсируемых газов

Газ	α	A	B	C	D	E
He	0,7	2,8	–9,5	3,0	3,1	0,3

Продолжение таблицы 3.11

Газ	α	A	B	C	D	E
Ar	0,3	7,8	475,0	-30,4	11,4	0,0
Kr	0,3	4,4	319,0	-18,0	7,4	0,0
Xe	0,2	8,8	498,0	-25,0	4,9	0,0
H ₂	0,8	1,7	0,0	17,0	0,0	0,0
N ₂	0,7	0,6	0,0	-6,8	0,0	0,0
O ₂	0,7	0,7	0,0	-10,5	0,0	0,0

Используя данные, приведённые в [129], можно получить следующую корреляционную формулу для теплопроводности водяного пара (в Вт/м/К) (используется при расчёте транспорта водяного пара в ТЖМТ):

$$\lambda \times 10^3 = A + B_1 \cdot Z + B_2 \cdot Z^2 + B_3 \cdot Z^3 + B_4 \cdot Z^4, \quad Z = (T - 300)/1000. \quad (3.51)$$

В уравнении (3.51) коэффициенты A, B₁, ..., B₄ представлены в виде полиномов по давлению:

$$A = \sum_{n=0}^4 \alpha_n (10^{-6} P)^n, \quad B_i = \sum_{n=0}^4 \beta_{in} (10^{-6} P)^n. \quad (3.52)$$

Значения полиномиальных коэффициентов α_n и β_{in} приведены в таблице 3.12. Соотношения (3.51), (3.52) позволяют рассчитать теплопроводность водяного пара с погрешностью $\leq 2\%$ в интервале давлений $0,1 \text{ МПа} < P < 15 \text{ МПа}$ и температур $T_{\text{boil}}(P) < T < 1073 \text{ К}$. Зависимость температуры кипения воды, $T_{\text{boil}}(P)$, от давления в указанном интервале значений аппроксимируется формулой (с точностью до 10^{-3}):

$$T_{\text{boil}}(p) = 372,5644 \cdot p^{0,4328} + 3,77773 \cdot p + 0,71322 \cdot p^2 - 0,03949 \cdot p^3, \quad p = 10^{-5} P. \quad (3.53)$$

Таблица 3.12 – Коэффициенты полиномов в (3.52)

n	0	1	2	3	4
α_n	20,3688	7,7688	4,8144	–0,8632	0,0536
β_{1n}	59,48822	–60,76309	–27,71150	5,46583	–0,35714
β_{2n}	134,84086	177,62908	57,54220	–12,55757	0,87094
β_{3n}	–114,11426	–229,19195	–49,08098	12,36008	–0,92289
β_{4n}	46,16289	104,72333	14,92850	–4,49336	0,3626

По аналогии с вязкостью, теплопроводность смеси газов можно представить в виде (3.54) [141]:

$$\lambda_{\text{mix}} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i \lambda_i}{\sum_{j=1}^n x_j A_{ij}} = \sum_{i=1}^n \frac{P_i \lambda_i}{\sum_{j=1}^n P_j A_{ij}}, \quad (3.54)$$

где λ_i и P_i – соответственно теплопроводности и парциальные давления компонентов смеси;

функции A_{ij} определяются соотношениями (3.55) [142]:

$$A_{ij} = \varepsilon \cdot \frac{\left[1 + \left(\lambda_{\text{tr},i} / \lambda_{\text{tr},j} \right)^{1/2} \left(M_{r,i} / M_{r,j} \right)^{1/4} \right]^2}{\left[8 \left(1 + M_{r,i} / M_{r,j} \right) \right]^{1/2}}, \quad (3.55)$$

где $M_{r,i}$ – молекулярная масса компонента (а.е.м.);

$\lambda_{\text{tr},i}$ – «трансляционная» часть теплопроводности масса компонента;

ε – эмпирическая числовая константа порядка единицы. В базе данных согласно рекомендации [137] $\varepsilon = 1$.

Для отношения $\lambda_{\text{tr},i} / \lambda_{\text{tr},j}$ используется следующая корреляционная формула (3.56) [142]:

$$\frac{\lambda_{\text{tr},i}}{\lambda_{\text{tr},j}} = \frac{\Gamma_j \exp(0,0464 \cdot T_{r,i}) + \exp(-0,2412 \cdot T_{r,i})}{\Gamma_i \exp(0,0464 \cdot T_{r,j}) + \exp(-0,2412 \cdot T_{r,j})}, \quad (3.56)$$

где

$T_{r,i} = T/T_{cr,i}$ – приведённая температура газа i с критической температурой $T_{cr,i}$;

фактор Γ_i – характеристическая обратная теплопроводность газа i (с размерностью м·К/Вт), заданная соотношением (3.57):

$$\Gamma_i = 452431,35 \left(\frac{M_i^3 \cdot T_{cr,i}}{P_{cr,i}^4} \right)^{1/6} = 210 \cdot \left(\frac{T_{cr,i} \cdot M_i^3}{(10^{-5} \cdot P_{cr,i})^4} \right)^{1/6}. \quad (3.57)$$

Значения констант Γ для газов из базы данных приведены в таблице 3.9.

Коэффициенты газовой диффузии

Коэффициенты бинарной диффузии

Для расчёта коэффициентов бинарной газовой диффузии используется формула, полученная в [137, 143, 144, 145] на основе модифицированного уравнения Чэпмена–Энскога:

$$D_{AB} = 1,43 \cdot 10^{-2} \frac{T_g^{1,75}}{P \cdot M_{AB}^{1/2} \cdot [V_A^{1/3} + V_B^{1/3}]^2} \quad (\text{м}^2 / \text{с}), \quad (3.58)$$

где T_g – температура газа (в К), P – полное давление (в Па), M_{AB} – приведённая молярная масса (в г/моль) компонентов, заданная уравнением

$$M_{AB} = \frac{2M_A M_B}{M_A + M_B}, \quad (3.59)$$

V_A и V_B – диффузионные молярные объёмы (в Å^3). Данные по некоторым молекулам приведены в таблице 3.13. Если данные для молекул какого-либо типа отсутствуют, соответствующие молярные объёмы могут быть вычислены (оценены) путём суммирования атомарных объёмов

$$V_A = \sum_i b_{i,A} V_i, \quad (3.60)$$

где V_i – диффузионный объём атома, $b_{i,A}$ – стехиометрический коэффициент, определяющий число атомов типа « i » в молекуле A . Диффузионные молекулярные и атомные объёмы, найденные в результате анализа экспериментальных данных по газовой диффузии [143, 144, 145], приведены в таблице 3.13.

Таблица 3.13 – Атомные и молекулярные диффузионные объёмы в Å³

He	Ar	Kr	Xe	H ₂	N ₂	O ₂
2,7	16,2	24,5	32,7	6,1	18,5	16,3

Коэффициенты диффузии для смеси газов

Для компонентов смеси с малой концентрацией чаще всего используется простое соотношение, именуемое законом Бланка [146, 147]:

$$D_{i,\text{mix}} = \left(\sum_{\substack{j=1, \\ j \neq i}}^{j=N} \frac{X_j}{D_{ij}} \right)^{-1}, \quad (3.61)$$

где X_i – мольные доли;

D_{ij} – коэффициенты бинарной диффузии.

Если смесь подчиняется уравнению состояния идеального газа, уравнение (3.61) можно представить в виде

$$D_{i,\text{mix}} = P_{\text{tot}} \left(\sum_{\substack{j=1, \\ j \neq i}}^{j=N} \frac{P_j}{D_{ij}} \right)^{-1} \quad (3.62)$$

где P_j – парциальные давления компонентов смеси, P_{tot} – полное давление.

Коэффициенты диффузии неконденсируемых газов в воде

Для расчёта коэффициента диффузии молекул А в растворителе В используется метод из [148], [137]:

$$D_{AB} = 7,4 \cdot 10^{-15} \frac{(\phi_B \cdot M_B)^{1/2} \cdot T_f}{\mu_B \cdot V_A^{0,6}} \quad (\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}), \quad (3.63)$$

где μ_B – динамическая вязкость растворителя в единицах Па·с (= кг/(м·с));

M_B – молярный вес растворителя в г/моль;

ϕ_B – безразмерный параметр, для воды ($B = \text{H}_2\text{O}$) выбирается в виде $\phi_{\text{H}_2\text{O}} = 2,6$;

V_A – молярный объём молекул A в точке кипения при нормальных условиях в единицах $\text{см}^3/\text{моль}$.

Данные относительно молярных масс приведены в таблице 3.8. Молярный объём V_A (в $\text{см}^3/\text{моль}$) можно оценить с помощью корреляционной формулы [149], [137]:

$$V_A = 0,285(10^6 \cdot V_{A,cr})^{1,048} \quad (3.64)$$

где $V_{A,cr}$ – критический объём вещества A (в $\text{м}^3/\text{моль}$). Данные по критическим объёмам неконденсируемых газов (N_2 , H_2 , O_2 , He , Ar , Xe , Kr) приведены в таблице 3.9.

3.9 Свойства материалов твэла

В настоящее время база данных включает теплофизические и термомеханические свойства следующих материалов, необходимых для расчёта твэлов реакторных установок на быстрых нейтронах:

- оболочечные стали: ЧС-68 ХД, ЭП-823, ЭП-450;
- топливные композиции: диоксид урана, МОКС, мононитридное и смешанное нитридное топливо.

3.10 Заключительные и обобщающие замечания по разделу 3

В разделе 3 приведено описание разработанной базы данных по свойствам материалов и теплоносителей. На основании анализа современных баз данных по свойствам материалов и опыта разработки и использования программных комплексов для анализа безопасности АЭС определены требования к базе данных, включая графический интерфейс пользователя, системе её управления и механизму использования свойств из базы данных в программных комплексах. База данных реализована программно. Хранение данных организовано через XML-файл. Разработан удобный механизм использования базы данных в программных комплексах в виде динамически подключаемых библиотек расчётных функций, существенно сокращающих время разработки программных комплексов в части операций, необходимых для реализации свойств материалов и механизмов работы с ними.

Для наполнения базы данных свойствами теплоносителей РУ на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем проведен анализ свойств жидкометаллических теплоносителей: натриевого, свинцового и свинцово-висмутного. Используемые в базе данных свойства натриевого теплоносителя базируются на работах J.K.Fink [128] и А.М.Семенова [131]. Следует отметить, что на прошедшей в 2017 г. международной конференции по быстрым

реакторам FR-17 один из докладов был посвящен анализу данных по свойствам натриевого теплоносителя [150]. В итоге анализа было сформулировано, что до температуры 2300 К данные из работы [128] представляются достаточно надежными (авторами рекомендованы поправки к свойствам натриевого теплоносителя только при температурах выше 2300 К). В 2018 г. ожидается выпуск справочника МАГАТЭ по свойствам натриевого теплоносителя (NAPRO handbook), по результатам анализа которого значения в базе данных могут быть дополнены и/или скорректированы.

Что касается свойств свинцового теплоносителя, выполнены анализ и обобщение имеющихся данных из справочников и публикаций. В итоге для различных свойств рекомендованы данные из справочника ОЭСР, базы данных ИВТАНТЕРМО, справочника по редакции Глушко В.П. и других, отчетов по результатам экспериментальных измерений, выполненных в ИТ СО РАН и прочих источников. При оценке данных по свойствам свинцового теплоносителя был выполнен детальный анализ первоисточников: метод измерения, неопределённости измерения и т.д. При анализе имеющихся данных по измерениям теплопроводности свинца было показано, что полученные результаты экспериментальных измерений носили качественно различный характер. Были сформулированы требования к дополнительным экспериментальным измерениям, в том числе, с целью расширения диапазона температур до значений, характерных для аварийных режимов работы реакторной установки со свинцовым теплоносителем. В результате выполненных экспериментальных исследований и последующего анализа для использования при выполнении расчётов РУ на быстрых нейтронах рекомендовано использовать значения измерений, выполненных в ИТ СО РАН [100].

Реализованные в базе данных свойства свинцово-висмутового теплоносителя базируются на рекомендациях ОЭСР и справочника по свойствам материалов, выпущенного АО «ГНЦ РФ-ФЭИ».

Свойства водяного теплоносителя основаны на рекомендациях Международной Ассоциации по свойствам воды и пара.

4 Методика интеграции отдельных программных модулей в интегральные программные комплексы, подходы к программной реализации интегрального программного комплекса ЕВКЛИД/V1

4.1 Вводные замечания к разделу 4

В разделе 4 описаны общие подходы к программной реализации интегральных программных комплексов, которые могут быть применимы при создании программного обеспечения как в атомной, так и других отраслях промышленности. Подходы сформулированы в результате обобщения автором диссертационной работы опыта создания как отечественных, так и зарубежных программных комплексов, накопленного в течение 20 лет. При этом, безусловно, в связи с прогрессом в области вычислительной техники целый ряд принципов написания программного обеспечения, которые были справедливы десятилетия назад, в настоящее время полностью пересмотрен. Поэтому любые, даже самые широко используемые программные средства, нуждаются в постоянной поддержке и адаптации к особенностям современной вычислительной техники, включая внедрение в них технологий параллельных вычислений.

Интегральные программные комплексы обладают ещё и той спецификой, что в их создании участвуют большие коллективы аналитиков, теоретиков, программистов, тестировщиков, специалистов в области верификации программных комплексов и других. Это приводит к тому, что создать в разумные сроки качественный программный продукт невозможно без использования единых требований к разработке, начиная с шаблонов оформления отдельных подпрограмм и заканчивая использованием систем коллективной разработки программного обеспечения, систем автоматического тестирования. При этом указанные системы будут эффективны лишь в том случае, если работа организуется в соответствии с четкими регламентами. Именно таким образом была проведена работа по созданию интегрального программного комплекса ЕВКЛИД/V1. Соответствующие общие требования также описаны в настоящем разделе.

Интеграция отдельных программных модулей в единый комплекс – это нетривиальная задача, от эффективности решения которой зависит впоследствии гибкость разработанного программного обеспечения в части поддержки и интеграции новых программных модулей, возможность запуска программы под управлением различных операционных систем, трудоёмкость отладки и обмена данными между программными модулями.

Автором диссертационной работы разработана и сформулирована методика интеграции отдельных программных модулей, которая успешно апробирована на примере интегрального программного комплекса ЕВКЛИД/V1, сформулирована методика интеграции программных модулей в состав интегрального программного комплекса, выполнена программная реализация отдельных подпрограмм теплогидравлического модуля, отвечающих за замыкающие соотношения в тяжёлом жидкометаллическом теплоносителе, расчёт теплопроводящих структур, чтение и диагностику ошибок входного файла, запись выходных данных и плот-переменных, реализован обмен данными между отдельными модулями, разработаны шаблоны оформления отдельных подпрограмм на C++ и FORTRAN и правила коллективной разработки автономных модулей под системой SubVersion.

На созданный автономный теплогидравлический модуль получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ [151], на интегральный программный комплекс ЕВКЛИД/V1 – [31].

4.2 Методика и технология интеграции программных модулей, организация и управление расчётом

Для интеграции программных модулей в составе интегрального программного комплекса была разработана соответствующая методика. Методика была программно реализована в виде интегрирующей оболочки SMART_LM. Основной класс задач, решаемых с использованием интегрирующей оболочки SMART_LM, это нахождение зависимостей от времени при заданных начальных условиях. При этом интегрирующая оболочка реализует основной цикл по времени, запрашивая у программных модулей расчёт отдельных временных шагов.

Программные модули помещаются под интегрирующую оболочку SMART_LM в виде динамически загружаемых библиотек (*.dll под Windows и *.so под Linux), реализующих стандартизованный интерфейс взаимодействия с управляющей программой интегрирующей оболочки.

Управляющая программа организует расчёт конкретной задачи, загружая необходимые для расчёта программные модули, реализует главный временной цикл, а также осуществляет обмен данными и ввод-вывод.

Для адаптации программного модуля под интегрирующую оболочку SMART_LM необходимо провести модификацию исходных текстов программного модуля и выделить следующие функции:

- smart_init – регистрирует обработчиков служебных и обменных запросов;
- PreStart – отвечает за ту часть межмодульного обмена, которая не зависит от входного файла;
- Start – чтение входного файла;
- Link – инициализирует межмодульный обмен (передаёт указатели на обменные структуры);
- PreRun – инициализирует расчёт и задаёт список выходных переменных;
- Load – чтение файла продолжения расчёта (рестарт-файла);
- Save – записывает данные в файл продолжения расчёта;
- PlotData – подготовка данных для записи в файл интегрированного вывода (для последующего графического отображения данных постпроцессором SmartViewer, описанным в подразделе 4.9 данной диссертационной работы);
- Output – запись данных в текстовые выходные файлы;
- PreStep – действия перед шагом по времени;
- Step – расчёт одного шага по времени;
- PostStep – действия после шага по времени;
- Stop – завершение расчёта (освобождение памяти и т.д.).

Для оболочки SMART_LM были разработаны шаблоны перечисленных функций на языке C++ и FORTRAN. Для реализации этих функций к программному модулю необходимо подключить заголовочный файл Module++.h для языка C++ или модуль ForMod.f90 для языка FORTRAN, в которых определены вспомогательные типы и классы для реализации необходимой функциональности, например, запись двоичного файла интегрированного вывода для последующего отображения в постпроцессоре.

Для создания автономного программного модуля (если разработчик хочет сохранить версию, которая будет работать без интегрирующей оболочки SMART_LM) его разработчику необходимо написать управляющую программу, которая будет вызывать описанные выше функции.

При запуске под оболочкой SMART_LM взаимодействие программного модуля с управляющей программой реализовано через перечисленные выше функции. Программный модуль декларирует и регистрирует функции, а интегрирующая оболочка их вызывает по необходимости. Схема вызовов функций оболочкой SMART_LM представлена на рисунке 4.1.

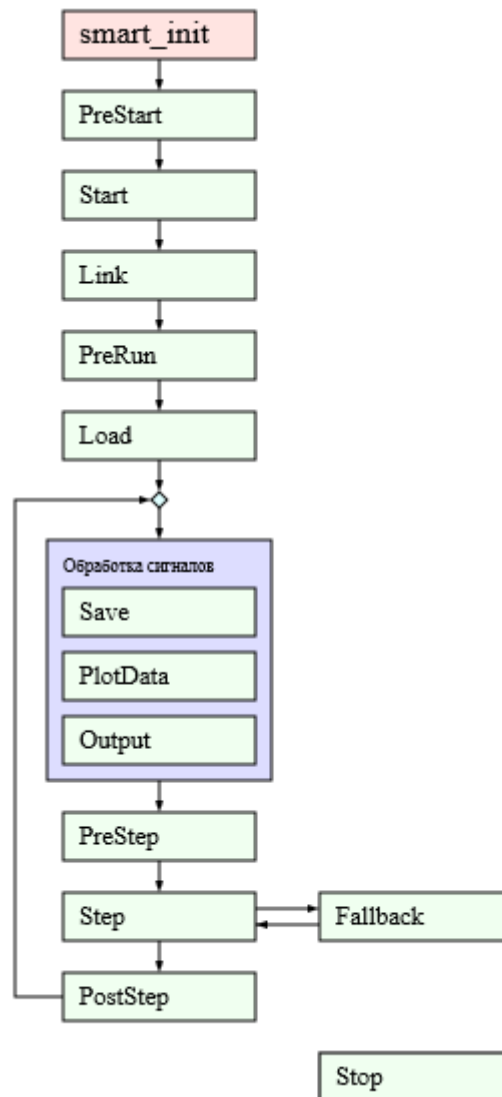


Рисунок 4.1 – Схема вызовов функций программных модулей под оболочкой SMART_LM

Временной шаг регулируется управляющей программой, исходя из данных во входных файлах и запросов программных модулей. Однако возможна ситуация, когда один из модулей не может произвести расчёт с запрашиваемым временным шагом (численная неустойчивость, превышение максимальной погрешности и т. п.). В этом случае задействуется механизм «отката» шага (Fallback) (возвращение к предыдущему шагу по времени и выполнение расчёта с меньшим временным шагом): уже вычисленные на следующий шаг по времени значения заменяются значениями на начало шага, шаг по времени уменьшается, и расчёт шага начинается заново. Для реализации «отката» шага каждый модуль должен хранить два набора своих данных: текущий (new) и с предыдущего шага по времени (old). В этом случае, в функции PreStep обычно реализуется перенос текущего набора данных в старый (new → old), а

в функции Step старый набор данных используется только для чтения, а текущий – для записи (old → new).

В интегрирующей оболочке SMART_LM реализовано два механизма обмена данными между модулями:

- копирование;
- обмен через общую память.

Механизм обмена через общую память обеспечивает минимальные затраты на обмен данными в предположении, что параллельность основана на декомпозиции расчётной области.

Для реализации обмена данными необходимо:

а) Завести обменную структуру в программных модулях, между которыми должен быть реализован обмен данными. Обменная структура должна включать в себя все необходимые данные, включая размерности массивов. Данные в обменных структурах программных модулей должны быть согласованы по памяти (то есть, если модули, которые будут обмениваться данными, реализованы на одном языке программирования – структуры должны быть одинаковыми). Самый простой способ – это использовать общий файл с объявлением в двух программных модулях. Поля в обменной структуре могут быть заведены как указатели (в случае обмена через общую память) или как фиксированные массивы (в случае копирования).

б) Выделить память и синхронизировать обменные структуры. Для реализации обмена через общую память необходимо, чтобы обменные структуры в программных модулях были настроены на одну и ту же память. На данном этапе необходимо определить, кто является клиентом, а кто сервером для обмена, а также, кто занимается выделением памяти (аллокацией), а кто её использует. Функция клиента – инициировать обмен (вызвать функцию обмена), функция сервера – принять запрос и реализовать обмен данными. Понятия сервера и клиента имеют смысл только по отношению к одной конкретной связи, причем один и тот же модуль может быть сервером с точки зрения одной связи и клиентом с точки зрения другой. Обычно выделением памяти занимается клиент, но это требование не является обязательным. В результате данного шага должна быть запрограммирована функция выделения памяти.

в) Разработать и запрограммировать функцию обмена, в которой обменные структуры копируются, при этом указатели, находящиеся в обменных структурах, настраиваются на одну и ту же память.

После того как реализованы изменения в программных модулях в соответствии с пунктами а)–в), в функциях инициализации программных модулей, между которыми производится обмен (рисунок 4.1), проводится регистрация обмена с помощью служебных

функций оболочки SMART_LM, которые заполняют таблицу обменных функций, то есть присваивают обменной функции идентификатор ID, соответствующий первому полю обменной структуры.

Служебные функции вызываются и у клиента и у сервера. Поле ID используется только у клиента. В программном модуле–клиенте должна быть вызвана служебная функция FM_Register для языка FORTRAN или SelectPort для языка C++.

Аргументами функций являются:

- текстовой идентификатор одной из связей – произвольное имя связи, которое будет отображаться в графической оболочке;
- идентификатор обменной структуры. Внутренний идентификатор, равный имени обменной структуры и номеру версии, который служит для проверки соответствия версий обменных структур. Версия должна изменяться после изменения формата обменной структуры. Используется для того, чтобы, если обменная структура изменилась в одном модуле, её невозможно было использовать со старой структурой второго программного модуля.

Результатом работы функций FM_Register и SelectPort является получение уникального идентификатора обмена (ID), соответствующего параметрам PortName и FormatName. В модуле – сервере вызывается служебная функция FM_SetHandler для языка FORTRAN или SelectPort для языка C++, которые устанавливают соответствие параметрам PortName и FormatName функции обмена Callback (функция обмена, описанная в подпункте в) выше).

После этого в функции PreRun модуль–клиент выделяет память и вызывает обмен с помощью функции FM_Request для языка FORTRAN или Request для языка C++. Аргументом функции является адрес обменной структуры. По этому запросу вызывается функция обмена в модуле–сервере. В результате работы обменной функции, если обмен производится через общую память, данные обменных структур программных модулей, между которыми проводится обмен данными, настраиваются на одну область памяти. Далее, внутри главного временного цикла, каждый программный модуль записывает данные в обменную структуру в зависимости от схемы расщепления или обращается к данным из этой структуры.

В случае копирования данных, выделение памяти проводят оба программных модуля, а функция обмена должна не просто приравнивать обменные структуры, а выполнять полное копирование всех внутренних массивов. Причем вызов обмена необходимо проводить не один раз в функции PreRun, а внутри главного временного цикла в соответствии со схемой расщепления.

Интегрирующая оболочка SMART_LM поддерживает две схемы расщепления: параллельную (асинхронную) и последовательную (синхронную). Первая схема аналогична методу Якоби для решения систем линейных уравнений: программные модули при расчётах используют только данные с прошлого шага и их порядок вызова не важен. Вторая схема аналогична методу Гаусса–Зейделя: при расчёте шага каждый программный модуль использует наиболее «свежие» (новые) данные других модулей, доступные на текущий момент. Расширение функциональности интегрирующей оболочки SMART_LM в части реализации других схем расщепления не является трудоёмкой задачей и может быть сделано, если появится соответствующая необходимость. Для переключения между этими двумя режимами используется параметр SchemeType с двумя возможными значениями: Parallel и Serial для параллельной и последовательной схемы соответственно. Параметр определяется во входном файле.

Перечисленные выше функции обеспечивают связанную работу программных модулей интегрального комплекса ЕВКЛИД/V1. При запуске программные модули декларируют и регистрируют описанные функции, а интегрирующая оболочка поочередно их вызывает в каждом из модулей. Временной шаг регулируется управляющей программой, исходя из данных во входном файле интегрального кода и запросов модулей. Для решения связанной задачи расчётные модули на каждом шаге обмениваются необходимыми данными. Обмен данными между программными модулями производится через общую память. При запуске расчёта каждый модуль получает указатель на обменную структуру. Данные берутся с предыдущего шага по времени (параллельная схема расщепления).

4.3 Общие принципы программной реализации

При создании современных программных комплексов рекомендуется придерживаться следующих общих принципов, позволяющих обеспечить эффективность выполнения расчётов:

- минимизация числа обращений к математическим функциям путём введения буферных переменных, хранящих результат вычисления математической функции для повторного использования при наличии такой возможности;
- объединение вызовов степенных функций при вычислениях произведений с кратными показателями степени. Приведение вызовов степенных функций к функциям с целочисленным показателем степени при наличии такой возможности (степенная функция с целочисленным показателем работает многократно быстрее);
- минимизация базового набора свойств объектов расчётной области, необходимого для обеспечения возможности «отката» (возврата) на предыдущий шаг по времени (Fallback) и

продолжения расчёта с заданного шага по времени (Restart);

- автоматизированная проверка корректности записи рестарт-файлов. Нарушение корректности базового набора, то есть отсутствие в нем каких-то необходимых величин, приводит к нарушению корректности возобновления расчёта. Такой тип ошибок крайне сложен в отладке, приходится выполнять локализацию недостающих полей по всему коду. В связи с этим, для проверки корректности набора данных для восстановления, реализован специальный режим самотестирования. При записи рестарт-файла, данные рестарта сохраняются в памяти, код выполняет несколько шагов по времени, выполняется расчёт интегральных величин и контрольных сумм по основным физическим переменным, затем выполняется возврат на сохранённый в памяти рестарт и пересчёт нескольких контрольных шагов. По результатам контрольного интервала сравниваются два полученных состояния системы, идентичность которых гарантирует корректность набора сохраняемых данных;

- определение операторов копирования для обменов Old (данные с предыдущего шага по времени) $\Leftrightarrow$ New (данные на новом шаге по времени). Такая процедура выполнена для всех основных модельных классов с небольшой локальной спецификой. Для того чтобы избежать ошибок в работе с базовым набором в операциях копирования, инициализации, применён специальный набор макросов для реализации универсальной функции автоматизированной обработки полей объекта. Набор макросов, каждый из которых работает в нескольких режимах, позволяет автоматически проверять соответствие списка обрабатываемых полей фактическому списку полей в описании класса, в том числе с учётом порядка описания полей. Эта функциональность особенно полезна для базовых наборов объектов с большим числом полей. Она позволяет избежать множественного перечисления всех полей в конструкторе, затем в операторе присваивания, затем в функции выгрузки и т.д. Список полей к обработке составляется только один раз в универсальной функции обработки. При этом существенно повышается защищённость кода от внесения ошибок: программист не сможет, например, добавить свойство в описание класса, забыв прописать обработку этого свойства в конструкторе или операторе присваивания. Универсальная функция вычислит позицию поля с учётом выравнивания, а также размер объекта, и, в случае расхождения, автоматически завершит выполнение программы с соответствующей диагностикой. Кроме того, этот подход защищает от проблемы доступа к неинициализированным данным, который во многих случаях приводит к появлению «странных» ошибок с нестабильным поведением;

- стандартный набор основных методов для классов объектов расчётной области, имеющих повышенную степень защиты от внесения ошибок:

1) универсальная функция автоматизированной обработки всех полей объекта, реализующая посредством специального набора макросов одновременно конструктор, оператор присваивания и текстовую выгрузку в отладочный файл (SetAll);

2) конструктор, по умолчанию вызывающий универсальную функцию SetAll в режиме конструктора;

3) оператор присваивания, вызывающий универсальную функцию SetAll в режиме присваивания для данного объекта и всех подобъектов;

4) функция выгрузки в текстовый отладочный файл значений всех полей объекта, вызывающая универсальную функцию SetAll в режиме выгрузки для данного объекта и всех подобъектов;

5) замещение данных с предыдущего временного подслоя данными с текущего временного подслоя – функция NewToOld. Используется при корректном завершении шага по времени;

6) замещение данных с текущего временного подслоя данными с предыдущего временного подслоя функция – OldToNew. Используется в случае возникновения ошибки для возвращения на предыдущий временной подслон;

7) чтение и запись полей ключевых данных в файл точки восстановления вычислений – функции WriteRestart, ReadRestart;

– управление выводом как в текстовые, так и двоичные файлы через соответствующий блок файла ввода входных данных для пользователя – задание сценария вывода. Этот сценарий состоит из блоков, в которых для заданных интервалов по времени задаются скважности (частота) вывода.

4.4 Пакет поставки интегрального программного комплекса ЕВКЛИД/V1 и основные принципы программной реализации автономных модулей

Пакет поставки интегрального программного комплекса ЕВКЛИД/V1 включает в себя три исполняемых файла: 1) расчётного ядра программного комплекса; 2) графической оболочки пользователя для задания исходных данных для выполнения расчётов; 3) постпроцессора для обработки результатов расчётов.

Поскольку интегральный программный комплекс имеет модульную структуру, то установочный пакет позволяет выполнять расчёты как с использованием взаимосвязанных, так и автономных модулей.

При разработке интегрального программного комплекса использовались методология объектно-ориентированного программирования и динамическая аллокация памяти. Программные модули интегрального кода написаны на языках C++ (HYDRA-IBRAE/LM/V1.1) и FORTRAN-2003 (БЕРКУТ, DN3D).

Разработка автономных программных модулей и интегрального программного комплекса ЕВКЛИД/V1 проводилась в системе коллективной разработки SubVersion. Для упорядочивания работ были сформулированы общие требования к структуре хранения данных под системой SubVersion и порядку оформления исходных текстов.

Структура хранения данных по каждому автономному программному модулю интегрального программного комплекса под управлением SubVersion имеет следующий вид:

1) Директория DOCUMENTS. В этой директории хранятся все документы, относящиеся к данному модулю в следующих папках:

- 1) User Guide – руководство пользователя.
- 2) Programmer Guide – руководство программиста.
- 3) Reference Manual – постановка задачи, с описанием моделей и численных алгоритмов.
- 4) Work – рабочие материалы.

2) V&V – тесты (верификационные) для автономного программного модуля (когда данный программный модуль работает без взаимодействия с другими модулями).

В корне директории V&V находится файл «Матрица верификации.xlsx», в котором представлена матрица верификации модуля и состояние работ по каждому тесту (ответственный, информация о выполнении верификации и местоположении результатов расчётов на сервере).

Папка V&V содержит две поддиректории «SET» и «IET». В директорию SET помещается информация по верификации на экспериментах по отдельным явлениям, IET – на интегральных экспериментах.

В директориях «SET» и «IET» тесты разделены на группы по теплоносителям, типам топлива и т.п.

Для каждого эксперимента или теста отводится своя директория. Наименование директории содержит фамилию первого автора экспериментальных данных, месяц и год опубликования экспериментальных данных (статья, отчёт). Например, «Beznosov_03_2009». После обязательной части названия директории из фамилии и даты публикации основной

статьи, по которой проводилась верификация, возможно добавление краткого поясняющего описания (к примеру «Savaterri_1985(crisis)»).

В корне этой директории находится отчёт (или глава в отчёт) по верификации кода на экспериментальных данных, содержащий всю необходимую информацию в соответствии с требованиями РД-03-34-2000, а также номер релиз-версии, с которой проводилась верификация, ОС, характеристики компьютера, на котором проводилась верификация, расчётное время.

В каждую директорию для конкретного теста входят следующие поддиректории:

Codes – в эту директорию помещаются файлы ввода входных данных.

Experiment – описание экспериментальных данных (статьи, оцифрованные экспериментальные данные и т.д.).

Pictures – графики, которые помещены в отчёт в формате Excel или ORIGIN.

3) PlantApplications – информация о расчётах модулем конкретных прикладных задач (режимов работы АЭС и т.д.). Директория PlantApplications содержит поддиректории, названия которых образованы от наименования соответствующей установки, например, BREST-OD-300, BN-600 и т.д. Каждая из директорий, которая относится к установке (BREST-OD-300, BN-600), содержит поддиректории, наименования которых происходят от наименований моделируемых режимов. В корне директории, относящейся к конкретному моделируемому режиму, находится отчёт или глава в отчёт. Директория содержит следующие поддиректории

- 1) Codes – входные файлы для моделирования данного режима.

- 2) Pictures – графики, которые помещены в отчёт в формате Excel или ORIGIN.

4) Source – исходные тексты данного модуля. Эта директория внутри себя имеет три основных поддиректории под управлением SubVersion: branches, tags, trunk.

- 1) Директория trunk – текущая, рабочая версия исходных текстов модуля.

- 2) Директория tags – release-версии текстов модуля, а также всё, что необходимо пользователям модуля для работы, в отдельной директории bin.

- 3) Директория branches – исходные тексты «веток» данного модуля, если для их введения возникает необходимость.

Каждая директория branches, tags, trunk содержит стандартные поддиректории: include – для хранения h-файлов, cpp – для хранения текстов на языке C++, fortran90 – для хранения текстов на языке FORTRAN-90, bin – для хранения готовых исполняемых файлов (*.exe) и библиотек (*.dll), script – для хранения скриптов, необходимых при создании исполняемых файлов и библиотек.

5) QA – тестовые входные наборы, которые необходимы для гарантии качества при разработке данного модуля.

Требования к тестам QA. Тесты, помещаемые в QA, должны иметь четкое и понятное описание (или в директории V&V или, для простых тестов, в разделе description входного файла). Необходимо, чтобы входной файл моделировал:

- существующий физический эксперимент, с которым возможно сравнение и последующий анализ полученных данных
- тестовую задачу, имеющую точное аналитическое решение. Также возможна тестовая задача, для которой имеется численное решение другими программными пакетами (Matlab, Mathematica и др.) Это необходимо при анализе результатов расчёта, которые не совпадают для новой и предыдущей ревизии программы в SVN.

Необходимо провести предварительный анализ теста, помещаемого в QA, относительно того, что результаты расчёта и входные параметры тестовой задачи находятся в границах применимости кода.

После того как разработчиком выполнен логически законченный кусок изменений в коде, разработчик должен:

- 1) произвести обновление своей рабочей версии до последней ревизии SVN;
- 2) провести процедуру очистки проекта (операция «Clean solution»);
- 3) произвести сборку проекта;
- 4) убедиться, что при сборке компилятор не выдал ошибок;
- 5) убедиться, что QA соответствует последней ревизии;
- 6) провести расчёты всех тестов из директории QA.

При фиксации новой версии автор ревизии обязан сделать краткое и доступное описание изменений в новой ревизии. Комментарии не должны зависеть от информации вне контекста фиксации (от изменений в предыдущей, следующей и других ревизиях проекта).

Для подтверждения прохождения тестов QA, автор ревизии обязан оставить комментарий в журнале SVN «QA OK» и написать количество пройденных тестов QA.

Кроме того, для однотипного написания исходных кодов были разработаны шаблоны оформления файлов .cpp, .h, .f90.

4.5 Технические характеристики вычислительных систем, требуемые для работы интегрального программного комплекса ЕВКЛИД/V1

Интегральный программный комплекс ЕВКЛИД/V1 работает под управлением операционных систем Microsoft Windows XP / 7 / 8 x64 и операционных систем семейства Linux.

Технические средства должны удовлетворять следующим системным требованиям:

- центральный процессор, совместимый с архитектурой X86, с тактовой частотой 2 ГГц и выше (рекомендуемые процессоры: Intel Core 2, Core I3, I5, I7; Intel Xeon E3, E5, E7; CPU и APU AMD архитектуры K10 и выше);
- объём оперативной памяти не менее 1 Гб;
- доступный объём дискового пространства не менее 500 Мб.

4.6 Текстовые входные файлы

Входной файл программного комплекса ЕВКЛИД/V1 должен быть подготовлен на языке XML [152]. Язык XML был выбран, исходя из следующих соображений:

- входной файл на языке XML – текстовый и может редактироваться как стандартными текстовыми процессорами, так и специфическими XML-редакторами, обладающими дополнительными возможностями, такими как синтаксический контроль, «скрытие», «сворачивание» содержимого отдельных подблоков, табличное представление однотипных узлов, использование схем для контроля обязательности, типов и многие другие возможности;
- язык XML даёт возможность ввода иерархических данных;
- для основных языков программирования разработаны стандартные средства обработки этих файлов – запросы атрибутов, циклы по полям и другие, что существенно упрощает обработку ввода исходных данных;
- формат является хорошей основой для разработки диалоговых систем ввода, передачи данных по сети.

Таким образом, XML язык становится удобным средством обработки данных и имеет значительные сервисные возможности как для пользователей, так и для разработчиков программных продуктов.

Для расчётов программный комплекс ЕВКЛИД/V1 использует несколько файлов (смотреть таблицу 4.1), в которых хранятся данные по:

- свойствам теплоносителя (натрий, свинец, эвтектика свинец-висмут, вода);
- свойствам материалов;
- нейтронным сечениям (готовится пользователем под конкретную задачу).

Таблица 4.1 – Базы данных интегрального программного комплекса ЕВКЛИД/V1

Имя файла (по умолчанию)	Описание	Путь (относительно головной директории)
NaProp_dat	Двоичный файл со свойствами натрия. Этот файл создаётся специальной программой-генератором из базы данных по свойствам материалов.	..\etc\Hydra_Euclid_Dll\
PbProp_dat	Двоичный файл со свойствами свинца. Этот файл создаётся специальной программой-генератором из базы данных по свойствам материалов.	..\etc\Hydra_Euclid_Dll\
PbBiProp_dat	Двоичный файл со свойствами эвтектики свинец-висмут. Этот файл создаётся специальной программой-генератором из базы данных по свойствам материалов.	..\etc\Hydra_Euclid_Dll\
WaterProp_dat	Двоичный файл со свойствами воды. Этот файл создаётся специальной программой-генератором из базы данных по свойствам материалов.	..\etc\Hydra_Euclid_Dll\
SmartDB.xml	База данных свойств материалов, газов, химических элементов.	..\etc\ и ..\etc\Hydra_Euclid_Dll\
UniLib_x64_Release.dll	Динамическая библиотека для работы с базой данных свойств материалов, газов, химических элементов.	..\bin-win64\
f_Chi.bin, f_Chi_s.txt, f_dif.bin, f_dif_s.txt, f_Sad.bin, f_Sad_s.txt, f_Sc.bin, f_Sc_s.txt, ...	Файлы, содержащие коэффициенты полиномов, используемые в модуле восстановления констант RESEAU.	..\etc\DN3D\const_reseau\diffusion\ (для диффузионной опции) или ..\etc\DN3D\const_reseau\CORNER\ (для кинетической опции)
f_Chi, f_dif, f_Sad, ...	Файлы констант, рассчитанных по программе CONSYST/RF.	..\etc\DN3D\const_interp\diffusion\ (для диффузионной опции) или ..\etc\DN3D\const_interp\CORNER\ (для кинетической опции)

Продолжение таблицы 4.1

Имя файла (по умолчанию)	Описание	Путь (относительно головной директории)
HEAD.TAB, g, m	Файлы библиотеки нейтронных констант БНАБ-93. Используются в модуле детального расчёта энерговыделения Q.	..\SI\

Для обработки входного файла программных модулей интегрального комплекса ЕВКЛИД/V1, написанных на языке C++, используется библиотека TinyXML [153], на FORTRAN – FoX [154].

При обработке файла входных данных существует несколько уровней диагностики для пользователя: предупреждения (warnings), ошибки (errors) и информационные сообщения (info). В случае если диагностируется ошибка, пользователь должен её исправить, в противном случае, расчёт выполняться не будет. В случае предупреждения – расчёт будет выполнен, однако пользователю настоятельно рекомендуется устранить в файле ввода исходных данных все предупреждения, поскольку они, часто, являются предвестниками ошибок. Информационные сообщения служат для уведомления пользователя.

Чтение входных данных для каждого программного модуля организовано иерархически. За чтение данных в каждом программном модуле отвечает подпрограмма ReadInput, которая вызывает методы ReadInput из каждого объекта. В подпрограмме чтения данных различных объектов из файла пользователя происходит обработка тегов и атрибутов, описанных в руководстве пользователя. При этом для каждого тега проводится проверка всех атрибутов. Если найден атрибут, отличный от указанных в руководстве пользователя, то выдаётся соответствующая диагностика (предупреждение). Для каждого атрибута проводится проверка значения на предмет его нахождения в допустимом диапазоне значений, также указанном в руководстве пользователя. В случае если задано значение не из диапазона, выдаётся диагностика (ошибка). Также сообщение об ошибке будет выдано в случае отсутствия в файле ввода исходных данных обязательных тегов и/или атрибутов, без которых интегральный программный комплекс не может начать расчёт.

4.7 Текстовые выходные файлы

Все выходные файлы помещаются в директорию, в которой находится исходный входной файл для данного расчёта.

Список выходных файлов интегрального кода ЕВКЛИД/V1 представлен в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Список выходных файлов интегрального кода ЕВКЛИД/V1

Имя файла	Описание выдачи данных в файле
*.plt	Двоичный плот-файл для отображения результатов расчёта постпроцессором.
*.rst	Двоичный рестарт-файл для продолжения расчёта.
*.msg	Диагностический файл, в который выводится информация о результатах чтения входных данных и итерационном процессе.
*.flag	Файл-признак защиты от удаления выходных файлов.
*_Hydraulics.out	Текстовый файл, содержащий результаты расчётов теплогидравлических характеристик течения теплоносителя.
Примечание: * означает имя входного файла программного комплекса ЕВКЛИД/V1.	

По запросу пользователя также могут выдаваться текстовые выходные файлы с заданными параметрами твэла.

4.8 Препроцессор для задания входных данных

Для удобства задания входных данных и контроля задаваемых параметров программный комплекс ЕВКЛИД/V1 снабжен графической оболочкой пользователя, написанной с использованием кроссплатформенного инструментария Qt, что позволяет с минимальными изменениями в исходных текстах модуля создать исполняемый файл, который будет запускаться в операционных средах семейства Linux и Windows. Язык разработки модуля – C++. Для успешного запуска и функционирования графической оболочки пользователя в комплект поставки должны входить вспомогательные динамически подключаемые библиотеки Qt.

В процессе работы в любой момент можно сохранить текущие данные, просмотреть созданный файл в текстовом виде и протестировать его на корректность введенных данных для проведения расчёта программным комплексом ЕВКЛИД/V1.

Общий вид препроцессора интегрального программного комплекса ЕВКЛИД/V1 показан на рисунке 4.2.

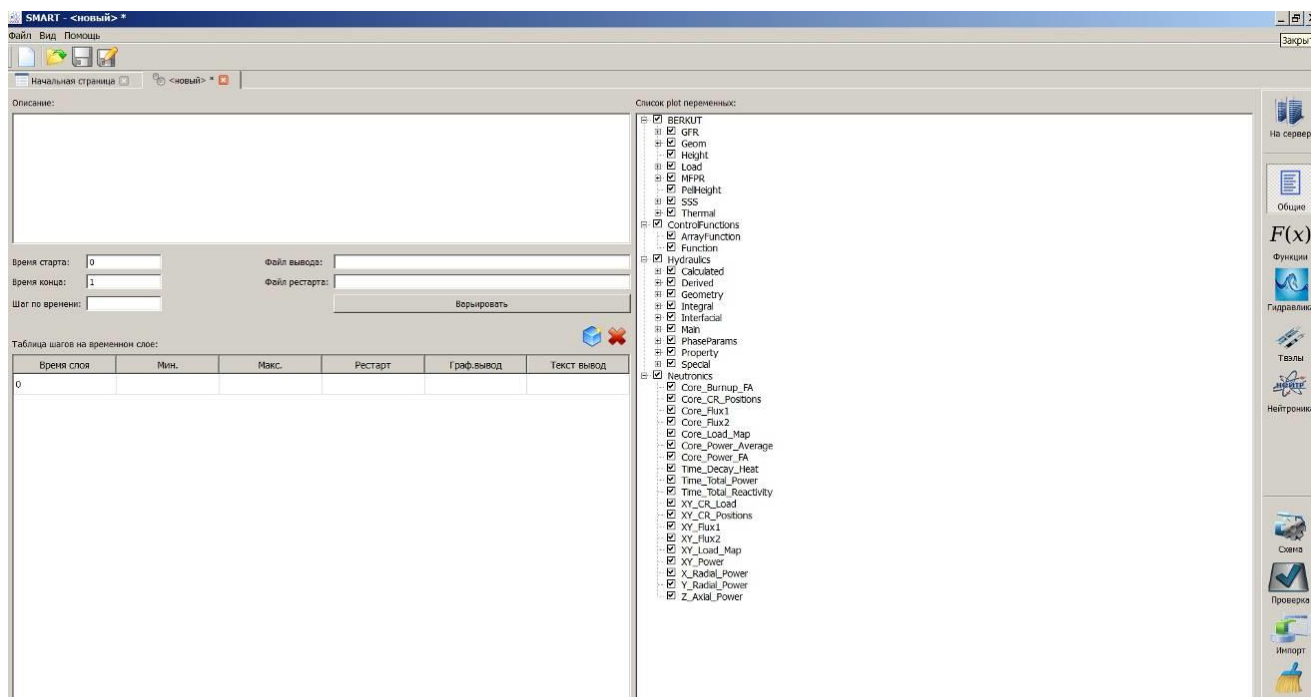


Рисунок 4.2 – Общий вид препроцессора интегрального программного комплекса ЕВКЛИД/V1

Подробная информация о задании данных в препроцессоре представлена в Help-системе, а также в [155].

4.9 Постпроцессор для отображения результатов расчётов SmartViewer

При разработке постпроцессора программного комплекса ЕВКЛИД/V1 были сформулированы следующие требования к графическим компонентам, предоставляющим средства отображения графиков на основе расчётных данных и их динамического управления:

- настройка графиков в соответствии с зарекомендовавшими себя научными программами;
- отображение расчётных значений времени в виде линейки при помощи манипулятора мышь;

- соответствие текущего времени, установленного на линейке, и расчётного значения на графике;
- сохранение графиков в форматах jpeg или png;
- обеспечение возможности импорта/экспорта данных в/из текстовые/текстовых форматы/форматов;
- обеспечение возможности сравнения различных данных на одном графике;
- реализация возможности задания и отображения функций от плот-переменных;
- обеспечение возможности отображения данных в процессе расчёта;
- обеспечение возможности отображения нейтронно-физических параметров на картограмме а.з., теплогидравлических параметров на нодализационной схеме.

Для реализации указанной выше функциональности был разработан постпроцессор SmartViewer. По умолчанию SmartViewer работает с файлами с расширением .plt. Подробная информация о постпроцессоре интегрального программного комплекса ЕВКЛИД/V1 в настоящей диссертационной работе приводиться не будет. Однако графики с рассчитанными интегральным программным комплексом ЕВКЛИД/V1 значениями (смотреть графики, представленные в разделе 7 диссертационной работы) построены в постпроцессоре.

4.10 Перечень данных, которыми обмениваются программные модули

Схема обмена данными и переменные, которыми обмениваются программные модули, показаны на рисунке 1.1.

В частности, теплогидравлическому модулю HYDRA-IBRAE/LM/V1.1 в качестве входных данных необходимо значение температуры поверхности оболочки твэла/пэла в градусах Кельвина (получает от модуля БЕРКУТ).

Нейтронному модулю DN3D необходимы следующие входные данные:

от модуля БЕРКУТ:

- средняя температура топлива в градусах Кельвина;
- средняя температура оболочки твэла/пэла в градусах Кельвина;
- аксиальное удлинение топливного столба в м;
- относительное изменение плотности тяжёлых ядер в расчётных ячейках;

от модуля HYDRA-IBRAE/LM/V1.1:

- температура теплоносителя в градусах Кельвина;
- уровень теплоносителя в каналах СПОС;

- плотность теплоносителя (кг/м^3).

Твэльному модулю БЕРКУТ необходимы следующие входные данные:

от модуля HYDRA-IBRAE/LM/V1.1:

- температура теплоносителя (К);
- скорость теплоносителя (м/с);
- давление теплоносителя (Па);
- коэффициент теплоотдачи (Вт/К/м^2);

от модуля DN3D:

- линейное тепловыделение в твэле/пэле (Вт/м);
- выгорание топлива;
- скорость реакции деления (дел/с/м^3).

4.11 Параллельные вычисления

Общие принципы распараллеливания в программном комплексе ЕВКЛИД/V1

В интегральном программном комплексе ЕВКЛИД/V1 за параллельные вычисления отвечает каждый программный модуль в отдельности. Реализована возможность запуска теплогидравлического и твэльного модулей на многопроцессорных системах с общей памятью.

К наиболее широко распространенным технологиям параллельного программирования относится интерфейс прикладного программирования многопоточных приложений OpenMP (Open Multi Processing) [156] для параллельной модели с общей памятью с множественным потоком команд и данных.

Ресурсоёмкость расчётов при использовании явных и полунеявных схем в интегральном программном комплексе ЕВКЛИД/V1 обусловлена необходимостью выполнения большого числа шагов интегрирования по времени с очень малым приращением времени (ограниченным критерием Куранта–Фридрихса–Леви и другими ограничениями в различных моделируемых физических процессах). Полностью неявные схемы для такого класса задач на практике не применяются, поскольку требуют многократно большего количества ресурсов на формирование якобиана и применения дополнительного итерационного процесса, что сильно усложняет реализацию и многократно увеличивает вычислительную стоимость шага по времени. При этом шаг по времени всё равно остается ограниченным в силу других ограничений (расчёт коэффициентов замыкающих соотношений и свойств теплоносителя, требования точности и так далее).

Расчёты в последовательном режиме практических задач из области применения интегрального программного комплекса ЕВКЛИД/V1 могут занимать несколько суток или даже недель, а отставание от реального времени, в зависимости от типа задачи, может составлять несколько порядков. Это обуславливает необходимость максимально возможного ускорения расчётов за счёт распараллеливания вычислительного алгоритма.

При этом структура вычислительной нагрузки является крайне сложной для параллельных вычислений. На каждом шаге интегрирования по времени выполняется множество алгоритмических операций, моделируются различные физические процессы. Всё это неизбежно требует большого количества точек синхронизации и обмена данными, что приводит к накладным расходам на распараллеливание. Вычислительная нагрузка при этом существенным образом обусловлена большим количеством шагов по времени, а не высокой вычислительной стоимостью этих шагов, что было бы гораздо удобнее для параллельных вычислений. Все это требует особого внимания к построению параллельной реализации.

При использовании интерфейса OpenMP порождается набор потоков (нитей), которые работают в общем контексте оперативной памяти с общим адресным пространством. Использование OpenMP имеет некоторые особенности, связанные с одновременным доступом к общей памяти, специфическими узкими местами многоядерных компьютеров. Одна из основных проблем, это пересечение по данным между параллельными нитями.

Работа по распараллеливанию программного модуля состоит из следующих основных этапов: создание инфраструктуры, то есть дополнительных программных модулей и внешних программ, которые обеспечивают работу параллельных областей; реализация в коде дополнительных структур данных; модификация расчётных циклов; реализация декомпозиции расчётных циклов и синхронизации; отладка и верификация параллельного кода. Для проверки корректности результатов в параллельном режиме используется сравнение на совпадение контрольных величин для основных рабочих массивов с физическими переменными.

Работа по повышению производительности выполнялась в порядке убывания вклада алгоритмических операций в общее время вычислений. То есть, в первую очередь оптимизировались и распараллеливались наиболее ресурсоемкие подпрограммы. Результаты распараллеливания нейтронно-физического модуля (кинетической опции) приведены в диссертационной работе [157].

Внедрение алгоритмов параллельных вычислений на основе технологии OpenMP в теплогидравлический модуль HYDRA-IBRAE/LM/V1.1

Реализация параллельных вычислений на основе модели с общей памятью в теплогидравлическом модуле HYDRA-IBRAE/LM/V1.1 осуществлена с помощью интерфейса прикладного программирования OpenMP стандарта 3.0 [156].

Распараллеливание с общей памятью выполнено в рамках подхода на основе декомпозиции вычислительных циклов. Основные наиболее ресурсоемкие алгоритмические операции, которые представлены в виде циклов по элементам расчётной области определённого типа, помещены в параллельные области OpenMP, обрабатываемые в многопоточном режиме. Для распределения витков циклов между параллельными потоками напрямую используются директивы OpenMP по распараллеливанию циклов (без пересчёта в явном виде границ циклов для каждой нити).

В зависимости от типа операции и вычислительной однородности обрабатываемых в цикле элементов расчётной области, для распределения витков цикла применяется либо статическая планировка (в случае вычислительной однородности), либо динамическая планировка с эмпирически подобранной величиной блоков распределяемых витков. Динамическая планировка также позволяет осуществлять досрочное завершение цикла при возникновении критической ошибки.

Конфликты по доступу к разделяемым параллельным потокам данных являются одной из главных проблем при распараллеливании с общей памятью. Для предотвращения состояния гонки и нарушения целостности доступа на запись к общим объектам в параллельном режиме особое внимание уделялось организации работы с глобальными объектами. К таким объектам относится главный сборник глобальных данных TimeData, в котором хранятся интегральные величины по расчётной области, а также объекты теплоносителей. Пересечение между параллельными потоками может возникать по большинству основных изменяемых в процессе счёта свойств глобальных объектов.

Для предотвращения конфликтов по доступу к общей памяти применен наиболее простой подход, заключающийся в размножении глобальных объектов по параллельным потокам, чтобы каждый поток мог иметь свой экземпляр глобального объекта.

Такой подход позволяет максимально упростить программную реализацию и полностью исключить возможность нарушения корректности доступа к памяти в параллельных областях. Следует отметить, что нарушение корректности доступа достаточно опасно и может приводить к сложным в отладке нестабильным ошибкам, меняющим свое поведение от запуска к запуску.

При входе в параллельную область OpenMP выполняется размножение глобального объекта по параллельным потокам. Каждый поток получает свой экземпляр объекта. При

завершении параллельной области у глобальных объектов предусмотрен специальный метод, который восстанавливает актуальный основной экземпляр глобального объекта. Задача этого метода состоит в получении глобальных значений свойств, категоризированных по операциям минимум, максимум или сумма. Для полей, по которым ищется сумма, запоминаются значения на момент перед входом в параллельную область, чтобы по выходу из многопоточного режима можно было бы вычислить приращение, полученное с каждой нити.

Для объекта теплоносителя используется большой объём табличных данных для расчёта различных физических величин состояния вещества. Для ускорения доступа к таблицам используются специальные поля для хранения позиционирования от предыдущего запроса. Поскольку в соседних расчётных ячейках состояния вещества часто близки, использование в качестве начальной позиции значения с предыдущего запроса ускоряет поиск соответствующей строки таблицы.

Сами данные, то есть свойства вещества, используются на чтение и не вызывают пересечения по данным. Однако доступ к свойствам позиционирования вызывает нарушение целостности доступа между параллельными потоками. Свойства позиционирования, с одной стороны, не хранят никакой глобальной величины, и для них не требуется сборка результирующего значения. В то же время при одновременном доступе в многопоточном режиме может нарушиться целостность доступа к данным. Для корректной работы со свойствами позиционирования в таблицах свойств и других аналогичных сервисных объектах был реализован специальный шаблонный класс для хранения значений индексов `MT_value` в многопоточном режиме. Свойства, отвечающие за позиционирование, переведены на этот тип данных, таким образом решается проблема доступа к разделяемым полям позиционирования по таблицам.

Класс `MT_value` предназначен для замены скалярных переменных базового типа `BaseType` на многопоточные аналоги `MT_value<BaseType>` с вектором из значений для каждой нити. В многопоточном режиме автоматически подставляется нужная позиция вектора, соответствующая номеру нити. Для этого класса перегружены все основные арифметические операции, операции сравнения, присваивания, преобразования типа. Таким образом, удаётся избежать изменений в подпрограммах, использующих эти переменные, поскольку для остальной программы неотличимо, какой тип имеет переменная – `MT_value<BaseType>` или `BaseType`, так как явно описан оператор преобразования типа от `MT_value<BaseType>` к `BaseType`.

Для работы в параллельном режиме с глобальными данными по расчётной области, которые содержит объект класса `tTimeData`, реализовано дублирование данного объекта между параллельными потоками. Данный объект содержит величину шага по времени, текущее физическое время, интегральные величины по расчётной области и т.д. Для изменения этих величин в параллельном режиме реализованы специальные подпрограммы:

- `void OMP_SpawnSharedData()` – переключение в параллельный режим на работу с актуальными копиями объекта `TimeData`, каждый параллельный поток получает свой экземпляр объекта, актуальный на момент открытия параллельной области;
- `void OMP_UnspawnSharedData()` – завершение параллельного режима, сборка копий объекта `TimeData` с параллельных потоков в один объект, обработка глобальных величин с учётом изменения интегральных величин с каждого потока для получения актуальных значений на момент завершения параллельной области.

В общей сложности используется 17 параллельных областей, распараллелено 43 расчётных цикла.

Тестирование распараллеливания теплогидравлического модуля

Тестирование распараллеливания теплогидравлического модуля интегрального программного комплекса ЕВКЛИД/V1 было выполнено на следующих задачах:

- РУ БРЕСТ-ОД-300: выход на стационарный режим работы на номинальном уровне мощности. Подробное описание сценария приведено в разделе 7.2 данной диссертационной работы. Нодализацияная схема включала в себя 221 канал, 3151 расчётную ячейку, 67 теплопроводящих структур с 1087 расчётными ячейками (далее – Задача 1);
- РУ БРЕСТ-ОД-300: ввод полного запаса положительной реактивности путём извлечения из активной зоны всех РО СУЗ с максимальной проектной скоростью при работе РУ на номинальной мощности со срабатыванием защиты ГЦНА. Подробное описание сценария приведено в разделе 7.2 данной диссертационной работы. Нодализацияная схема аналогична используемой в Задаче 1 (далее – Задача 2);
- РУ БН-1200: выход на стационарный режим работы на номинальном уровне мощности. Подробное описание сценария приведено в разделе 7.3 данной диссертационной работы. Нодализацияная схема включала в себя 61 канал, 2288 расчётных ячеек, 53 теплопроводящих структуры с 2157 расчётными ячейками (далее – Задача 3).

Ускорение в режиме OpenMP на многопроцессорном вычислительном узле кластерной системы под управлением ОС Linux

Используемый вычислительный узел имеет два 24-ядерных процессора Intel Xeon Platinum 8160 2.1 ГГц, 33 МБ L3 кэш, 6 каналов памяти DDR4.

Для выбора наиболее эффективного компилятора из установленных на системе выполнено сравнение компиляторов C++ GNU 4.8 и Intel C++ 17. Преимущество последнего составило в последовательном режиме 1,43 раза, поэтому для тестирования использовался компилятор Intel.

Выполнено сравнение различных режимов размещения параллельных потоков на многоядерных процессорах: компактное и вразброс. В первом случае потоки сгруппированы по процессорам, во втором случае соседние потоки оказываются на разных процессорах. Как и предполагалось, компактное размещение более эффективно, поскольку при распараллеливании с помощью OpenMP на многопроцессорном узле использование множественных процессоров влечёт дополнительные накладные расходы на поддержание кэш-когерентности и неоднородность доступа к памяти. Поэтому на рассматриваемых тестах ускорения от использования более одного процессора одним многопоточным процессом не наблюдалось. При использовании числа потоков, превышающего число ядер на одном процессоре, наблюдалась стагнация ускорения, и лишь незначительный прирост производительности. Поэтому далее в тестах рассматривалось использование только одного многоядерного процессора на поток с принудительной привязкой параллельных потоков процесса к этому процессору для исключения миграции потоков между процессорами.

Обработка результатов тестирования выполнялась путём осреднения расчётного времени по различным подпрограммам теплогидравлического модуля HYDRA-IBRAE/LM/V1.1 на рассматриваемом наборе тестов по контрольному отрезку интегрирования по времени. Число шагов по времени выбиралось таким образом, чтобы время последовательного выполнения контрольного отрезка занимало несколько десятков секунд. Далее в таблицах 4.3–4.5 приводятся результаты по оценке эффективности распараллеливания на Задачах 1–3. Под эффективностью понимается параллельная эффективность, определённая как отношение фактически получаемого ускорения относительно последовательного режима вычислений к числу ядер. Распределение времени по подпрограммам теплогидравлического модуля HYDRA-IBRAE/LM/V1.1 на различном числе ядер показано на рисунках 4.3, 4.5, 4.7. Параллельное ускорение для различных подпрограмм и для общего времени выполнения показано на рисунках 4.4, 4.6, 4.8. На графиках используются следующие обозначения:

- Before Step – инициализация на данном шаге интегрирования по времени;
- ClosingEq_CH – расчёт замыкающих соотношений в каналах;
- ClosingEq_HCS – расчёт замыкающих соотношений в теплопроводящих структурах;

- Calc_CH – формирование матрицы;
- End_Step – пересчёт термодинамических переменных в расчётных ячейках каналов, камерах, расчёт балансов.

Таблица 4.3 – Результаты измерений на интервале из 1000 шагов по времени для Задачи 1

Число ядер	Время, с	Ускорение, раз	Эффективность, %
1	27,42	1,00	100,00
2	15,12	1,81	90,68
4	8,38	3,27	81,83
6	6,21	4,41	73,58
8	5,10	5,38	67,20
12	4,07	6,73	56,10
16	3,52	7,78	48,64
20	3,32	8,26	41,30
24	3,19	8,59	35,78

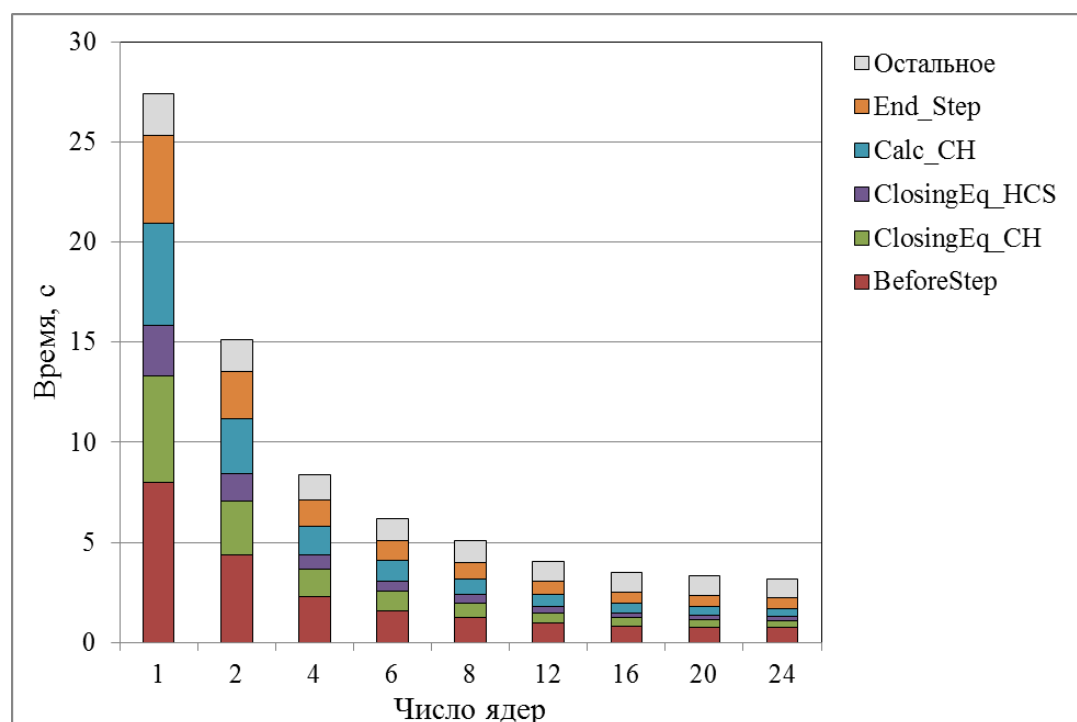


Рисунок 4.3 – Распределение времени по подпрограммам на различном числе ядер для Задачи 1

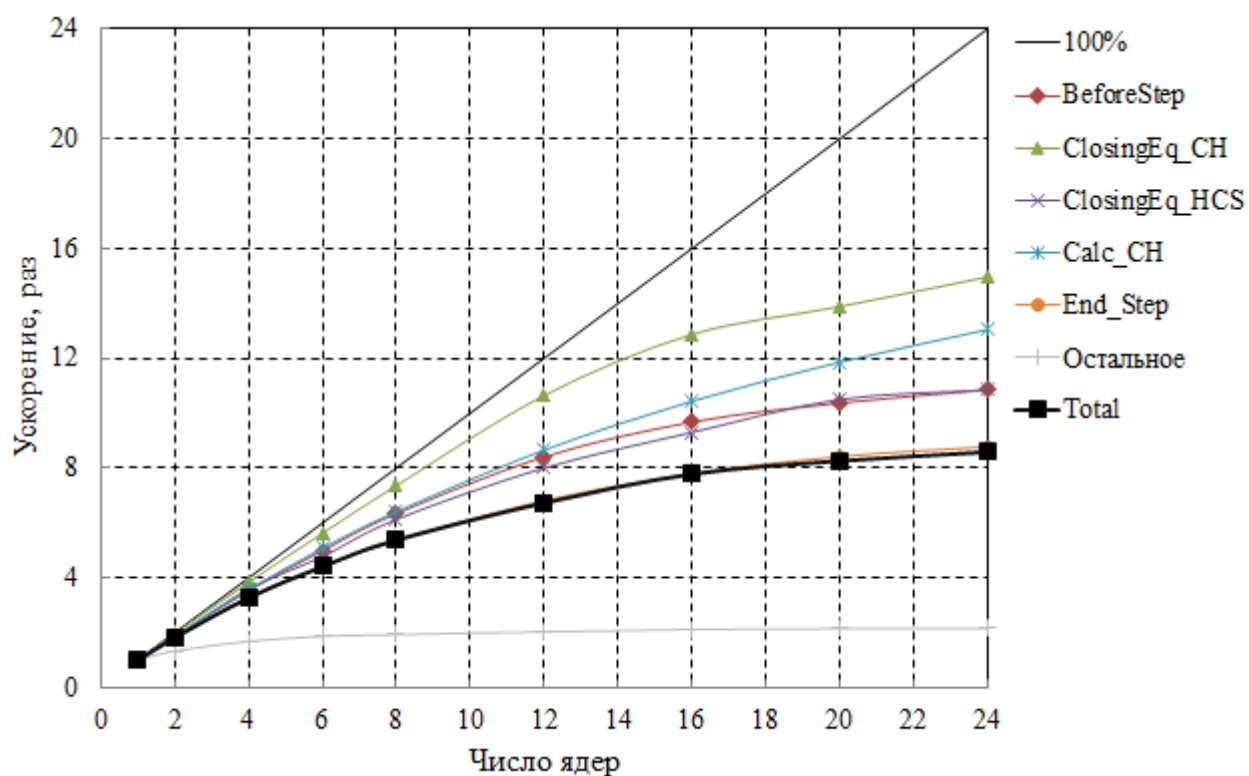


Рисунок 4.4 – Параллельное ускорение различных подпрограмм и общего времени выполнения для Задачи 1

Таблица 4.4 – Результаты измерений на интервале из 1000 шагов по времени для Задачи 2

Число ядер	Время, с	Ускорение, раз	Эффективность, %
1	37,67	1,00	100,00
2	20,85	1,81	90,36
4	11,71	3,22	80,41
6	8,69	4,34	72,26
8	7,15	5,27	65,83
12	5,71	6,60	55,01
16	4,96	7,60	47,51
20	4,66	8,08	40,42
24	4,45	8,47	35,28

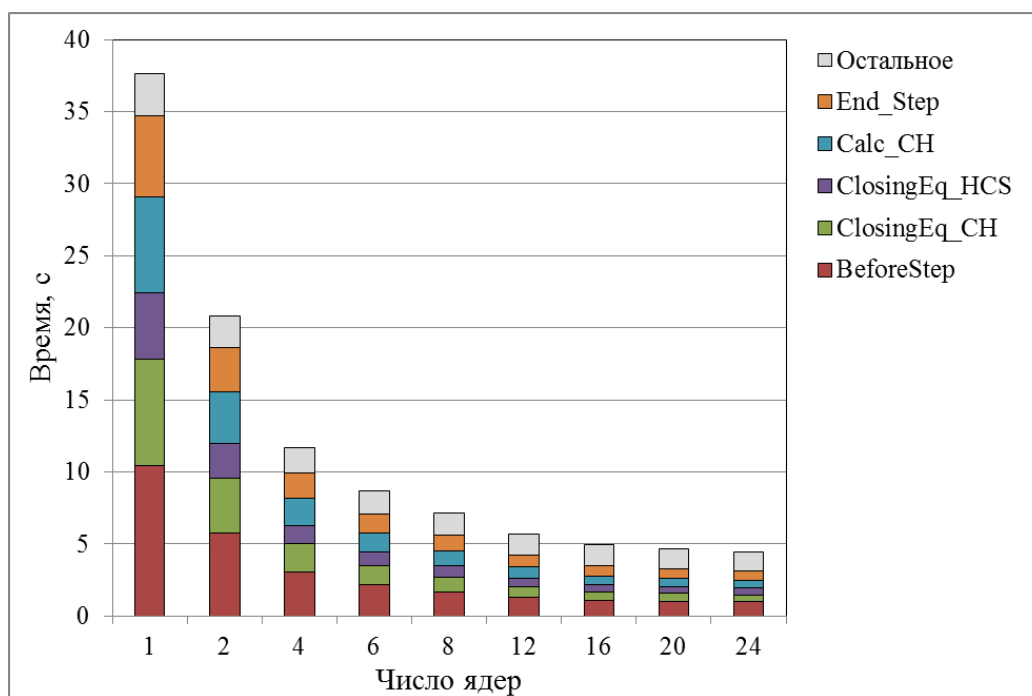


Рисунок 4.5 – Распределение времени по подпрограммам на различном числе ядер для Задачи 2

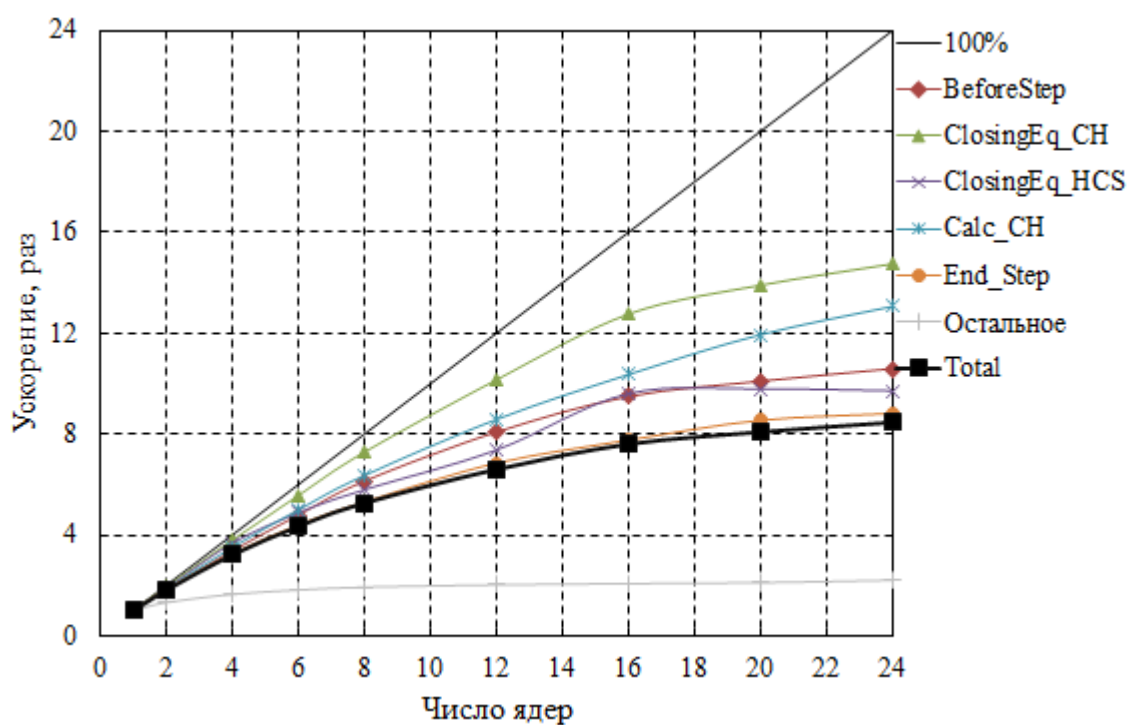


Рисунок 4.6 – Параллельное ускорение различных подпрограмм и общего времени выполнения для Задачи 2

Таблица 4.5 – Результаты измерений на интервале из 3000 шагов по времени для Задачи 3

Число ядер	Время, с	Ускорение, раз	Эффективность, %
1	48,20	1,00	100,00
2	26,48	1,82	91,01
4	16,53	2,92	72,91
6	12,64	3,81	63,55
8	11,19	4,31	53,86
12	10,50	4,59	38,25
16	10,51	4,59	28,66
20	10,57	4,56	22,80
24	10,32	4,67	19,46

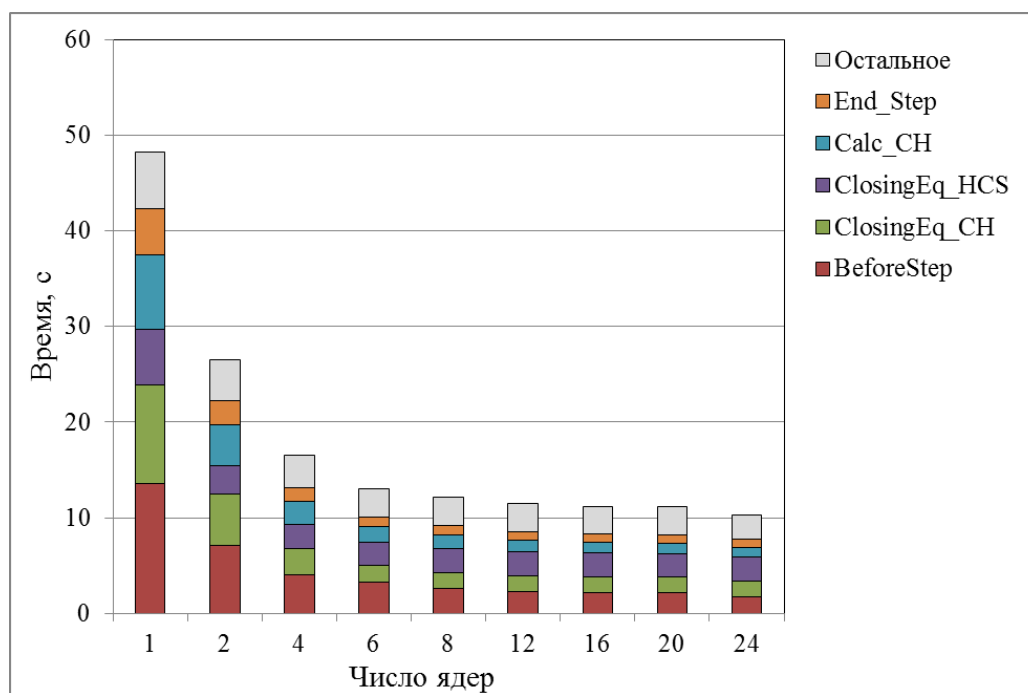


Рисунок 4.7 – Распределение времени по подпрограммам на различном числе ядер для Задачи 3

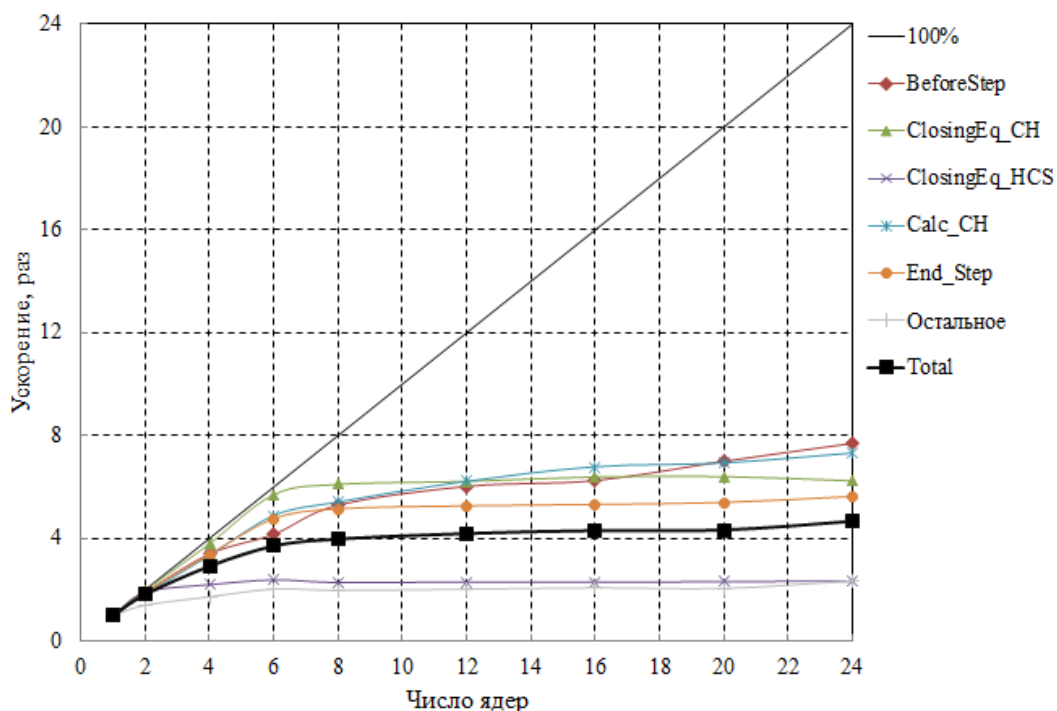


Рисунок 4.8 – Параллельное ускорение различных подпрограмм и общего времени выполнения для Задачи 3

По результатам тестирования максимальное ускорение на 24-ядерном процессоре для Задачи 1 составило 8,6 раз, для Задачи 2 – 8,5 раз, для Задачи 3 – 4,7 раз. Максимальное ускорение отдельных вычислительно-емких подпрограмм составило для данных тестов 15, 15 и 8 раз, соответственно.

Задачи 1 и 2 имеют одинаковую структуру расчётной области, отличается только моделируемый сценарий. По результатам отличие в ускорении составило около 1–2 процентов, что незначительно. Время расчёта, конечно, меняется на единицу физического времени, но ускорение примерно одинаково, поскольку структура вычислений на шаге по времени изменяется несущественно. Поэтому далее будет рассматриваться только первый из этих двух тестов.

Полученное ускорение на Задачах 1 и 2 превысило число каналов памяти процессора (6), но оно заметно меньше числа ядер (24). Это связано, в том числе, с большой неоднородностью расчётной области – имеется большой разброс по числу ячеек в каналах, а в большинстве каналов число ячеек мало. Поэтому, даже несмотря на динамическую планировку циклов, число каналов с большим числом ячеек недостаточно для того, чтобы загрузить вычислениями ресурсы 24-х ядер. Для стабилизации времени вычислений и улучшения балансировки загрузки

каналы и теплопроводящие структуры дополнительно упорядочивались по убыванию числа ячеек.

На Задаче 3 число каналов в несколько раз меньше, а разброс по числу ячеек также велик. Поэтому ускорение заметно меньше, чем в случае первых двух тестов. Как можно видеть из результатов на рисунке 4.8, параллелизм исчерпывается полностью на 12 ядрах.

Ускорение в режиме OpenMP на рабочей станции с многоядерным процессором под управлением ОС Windows

Рабочая станция под управлением ОС Windows 7 64 бит имеет два 6-ядерных процессора Intel Xeon E5-2630, 2.3 ГГц. Для сборки программного модуля использовался компилятор MS Visual Studio.

Тестирование ускорения выполнено аналогичным образом, как и на вычислительной системе под управлением ОС Linux. Далее в таблицах 4.6, 4.7 приводятся результаты по измерениям на Задачах 1 и 3. Число шагов по времени на контрольном интервале указано в таблицах. Распределение времени по подпрограммам теплогидравлического модуля HYDRA-IBRAE/LM/V1.1 на различном числе ядер показано на рисунках 4.9, 4.11. Параллельное ускорение для различных подпрограмм и для общего времени выполнения показано на рисунках 4.10, 4.12.

Таблица 4.6 – Результаты измерений на интервале из 1000 шагов по времени для Задачи 1

Число ядер	Время, с	Ускорение, раз	Эффективность, %
1	56,99	1,00	100,00
2	31,84	1,79	89,50
4	20,19	2,82	70,55
6	17,09	3,33	55,57

По результатам тестирования максимальное ускорение на 6-ядерном процессоре для Задачи 1 составило 3,3 раза, для Задачи 3 – 2,3 раза. Максимальное ускорение отдельных вычислительно-ёмких подпрограмм составило для данных тестов 5,1 и 5,2 раза соответственно.

Из результатов, показанных на рисунке 4.12, можно увидеть, что существенно ниже среднего ускоряется операция Calc_CH, вес которой в общем времени вычислений на Задаче 3

достигает 43 %. В данном случае ускорение у этой операции отсутствует, хотя она является полностью параллельной. При этом при тестировании на ОС Linux (рисунок 4.8) такая ситуация не наблюдается. Из этого можно сделать вывод, что на ОС Windows работа многопоточного приложения по части доступа к памяти менее эффективна.

Для подтверждения этого вывода было выполнено дополнительное тестирование на рабочей станции с ОС Linux, также оснащенной 6-ядерным процессором Intel Xeon Core i7-980, близким по характеристикам. Использовался компилятор GNU C++ 4.4. Время выполнения в последовательном режиме составило 22 с, на 6 ядрах – 7,1 с, что почти вдвое меньше, чем на ОС Windows. Ускорение составило 3,1 раза, что почти в полтора раза больше, чем на ОС Windows. Ускорение операции Calc_CH составило 3,4 раза, что выше среднего ускорения. Тем самым вывод был подтвержден.

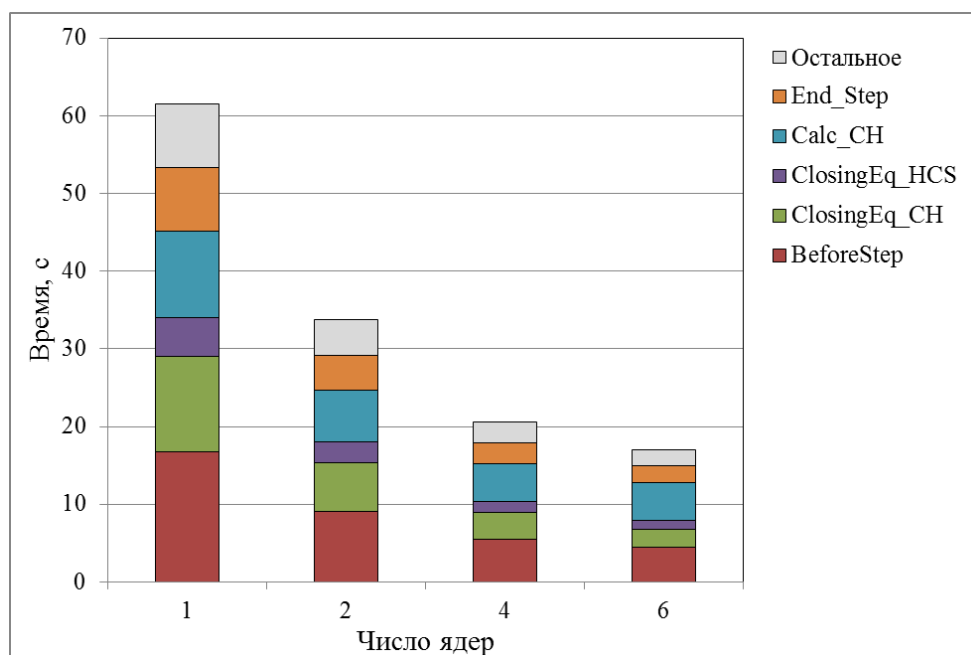


Рисунок 4.9 – Распределение времени по подпрограммам на различном числе ядер для Задачи 1

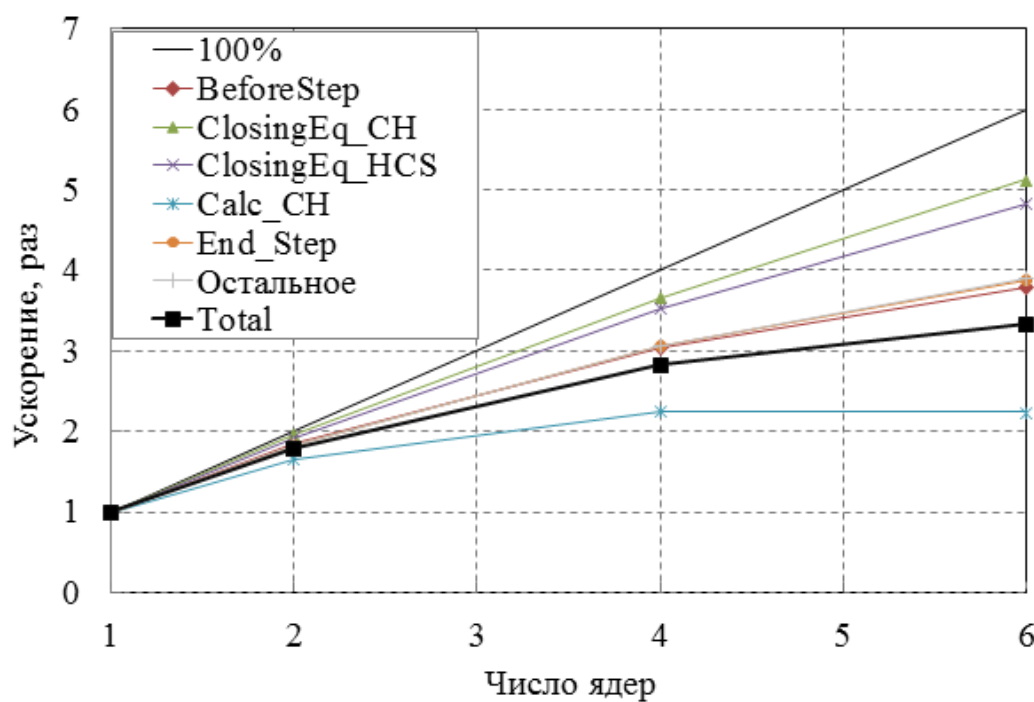


Рисунок 4.10 – Параллельное ускорение различных подпрограмм и общего времени выполнения для Задачи 1

Таблица 4.7 – Результаты измерений на интервале из 1000 шагов по времени для Задачи 3

Число ядер	Время, с	Ускорение, раз	Эффективность, %
1	29,83	1,00	100,00
2	17,57	1,70	84,87
4	12,94	2,31	57,64
6	13,68	2,18	36,35

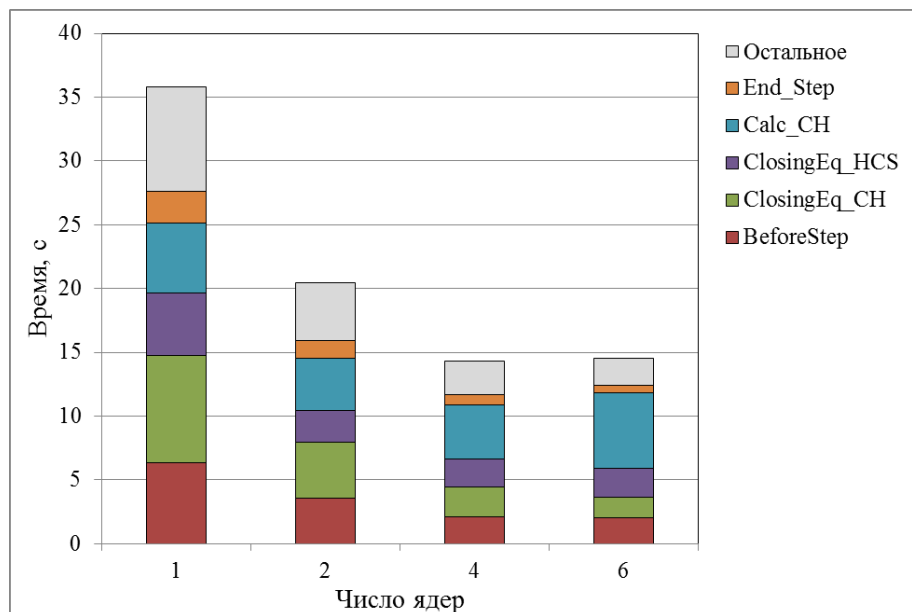


Рисунок 4.11– Распределение времени по подпрограммам на различном числе ядер для Задачи 3

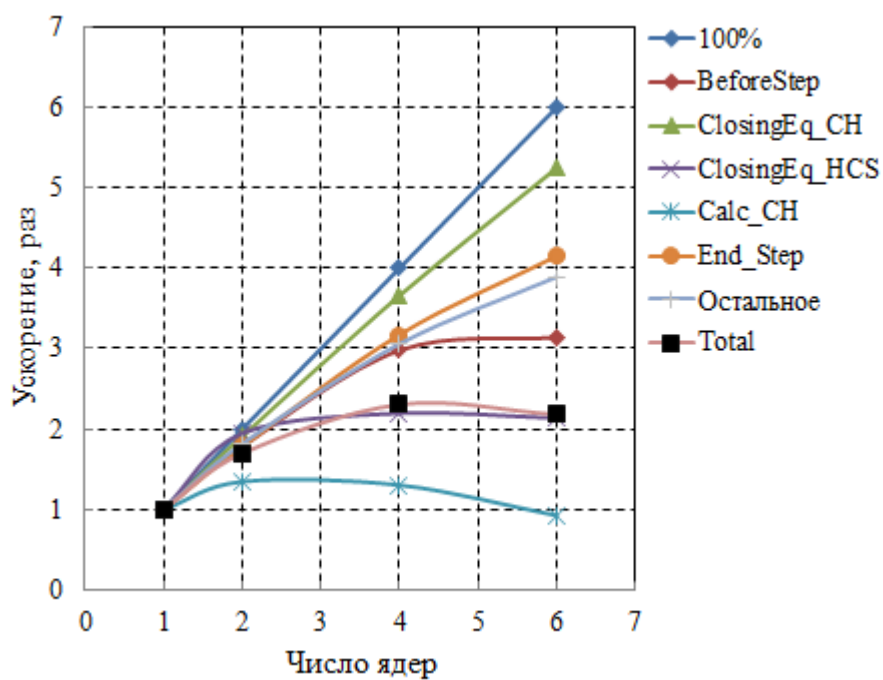


Рисунок 4.12 – Параллельное ускорение различных подпрограмм и общего времени выполнения для Задачи 3

Внедрение алгоритмов параллельных вычислений в твэльный модуль БЕРКУТ

Принцип реализации параллельных вычислений

Распараллеливание на основе модели параллельных вычислений с общей памятью реализовано в твэльном модуле с помощью интерфейса прикладного программирования OpenMP (Open MultiProcessing – открытое мультипроцессирование) стандарта 3.0 [156].

Распараллеливание с общей памятью выполнено в рамках подхода на основе декомпозиции циклов по элементам набора твэлов. Основные наиболее ресурсоемкие алгоритмические операции помещены в параллельные области OpenMP, обрабатываемые в многопоточном режиме.

В отличие от теплогидравлического модуля, в твэльном модуле вычисления по твэлам с точки зрения алгоритма полностью независимы по данным, что делает применение параллельных вычислений тривиальным. Распараллеливание сводится к распределению независимых вычислительных заданий между потоками. Основной объём работы был сосредоточен на устранении пересечения по данным на общих статических объектах. Временные структуры данных для хранения промежуточного результата были перенесены в объект твэла, чтобы у каждого твэла был свой экземпляр таких данных. Поскольку таких структур данных по всему коду было очень много, для поиска и устранения всех пересечений потребовались значительные усилия.

Для распределения витков циклов между параллельными потоками напрямую используются директивы OpenMP по распараллеливанию циклов (без пересчёта в явном виде границ циклов для каждой нити). Для распределения витков цикла применяется динамическая планировка.

Тестирование параллельной версии твэльного модуля

Для тестирования использовался тест, в котором моделируется облучение двух твэлов со СНУП топливом, проведённое в рамках эксперимента NIMPHÉ-1 в быстром натриевом реакторе PHENIX [158]. Всего в эксперименте NIMPHÉ-1 облучалось 11 твэлов с топливом $U_{0,8}Pu_{0,2}N$ и геометрией, характерной для твэлов реактора PHENIX. Чтобы протестировать работу распараллеливания на многоядерных процессорах, количество твэлов было увеличено до указанного ниже путём копирования исходной пары твэлов.

Ускорение в режиме OpenMP твэльного модуля на вычислительном узле под управлением ОС Linux

В тесте моделировалось 24 твэла.

Для тестирования распараллеливания использовалась та же вычислительная система, что и для тестирования теплогидравлического модуля HYDRA-IBRAE/LM/V1.1. Ускорение было измерено на 24-ядерном Intel Xeon Platinum 8160 2.1 ГГц (ядро Skylake).

График ускорения показан на рисунке 4.13. Из результатов видно, что полученное ускорение близко к идеальному. Ускорение на 24 ядрах составило 21,4 раза, что соответствует параллельной эффективности 89,2 %. Это заметно выше, чем у теплогидравлического модуля.

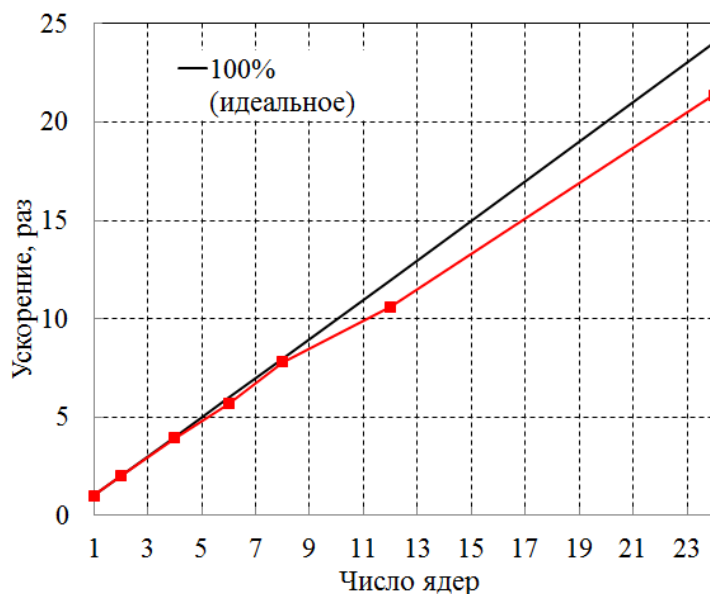


Рисунок 4.13 – Параллельное ускорение твэльного модуля на 24-ядерном процессоре, ОС Linux, моделируется конфигурация из 24 твэлов

Ускорение в режиме OpenMP твэльного модуля на рабочей станции под управлением ОС Windows

В данном случае в тесте моделировалось 12 твэлов.

Для тестирования распараллеливания использовалась та же рабочая станция, что и для тестирования теплогидравлического модуля HYDRA-IBRAE/LM/V1.1. Ускорение было измерено на 6-ядерном процессоре Intel Xeon E5-2630, 2.3 ГГц. На рабочей станции установлена ОС Windows 7 64 бит.

График ускорения показан на рисунке 4.14. Из результатов видно, что полученное ускорение 4 раза на 6 ядрах заметно ниже аналогичного результата 5,7 раз на 6 ядрах 24-ядерного процессора. Параллельная эффективность составила всего 67 %.

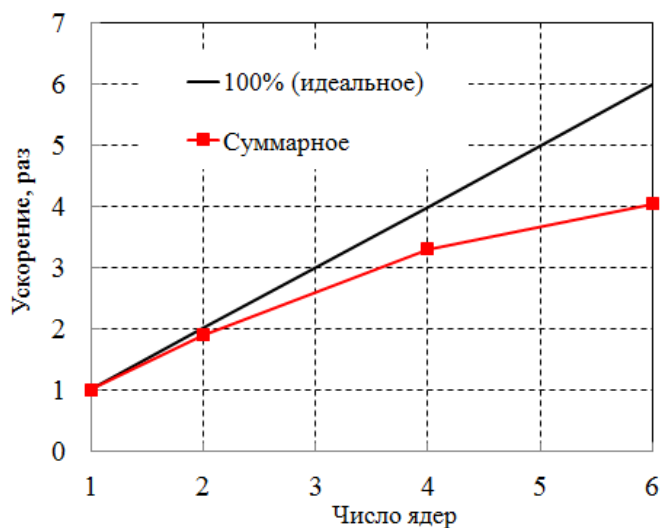


Рисунок 4.14 – Параллельное ускорение твэльного модуля на 6-ядерном процессоре, ОС Windows, моделируется конфигурация из 12 твэлов

Можно предположить, что, как и в случае с теплогидравлическим модулем, ОС Windows не обеспечивает высокой эффективности работы многопоточного приложения.

Дополнительно было выполнено тестирование на близкой по характеристикам рабочей станции под управлением ОС Linux, оснащенной 6-ядерным процессором Intel Xeon Core i7-980. График полученного ускорения показан на рисунке 4.15. Ускорение на 6 ядрах составило 5,4 раза, что соответствует параллельной эффективности 90 %. Это подтверждает выводы относительно меньшей эффективности работы многопоточного приложения на ОС Windows.

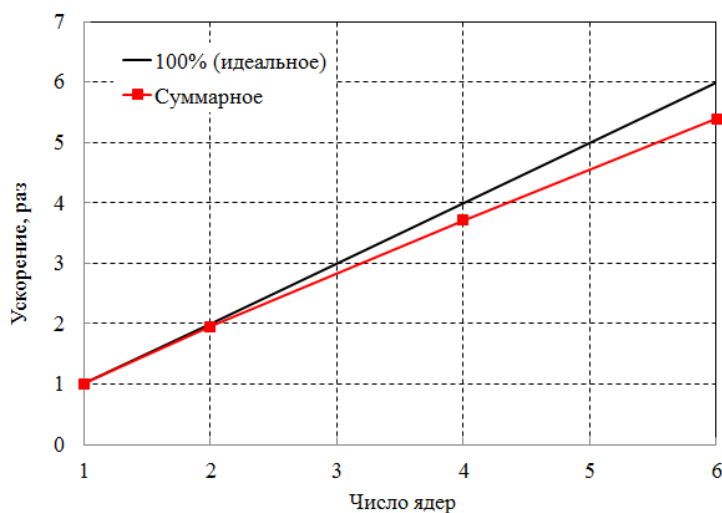


Рисунок 4.15 – Параллельное ускорение твэльного модуля на 6-ядерном процессоре, ОС Linux, моделируется конфигурация из 12 твэлов

4.12 Заключительные и обобщающие замечания по разделу 4

В разделе 4 описана разработанная методика интеграции программных модулей в состав интегрального программного комплекса, реализованная в виде интегрирующей оболочки SMART_LM. Методика заключается в выделении в программных модулях стандартизированных операций в виде отдельных функций (инициализации, чтения входных данных, расчёта шага по времени, межмодульного обмена, записи выходных данных и других); помещении модернизированных программных модулей в виде динамически загружаемых библиотек под интегрирующую оболочку; выполнении связанного расчёта управляющей программой интегрирующей оболочки SMART_LM, которая организует расчёт конкретной задачи, загружая необходимые программные модули, выполняя инициализацию для каждого модуля, главный временной цикл, а также обмен данными и ввод-вывод.

Методика апробирована при создании интегрального программного комплекса ЕВКЛИД/V1, результаты верификационных расчётов по которому, представленные в разделе 6 диссертационной работы, подтверждают, в том числе, корректность интеграции программных модулей.

Описаны ключевые особенности программной реализации отдельных модулей интегрального комплекса ЕВКЛИД/V1 и пакет поставки интегрального программного комплекса. При разработке интегрального программного комплекса использовались методология объектно-ориентированного программирования и динамическая аллокация памяти. Программные модули интегрального кода написаны на языках C++ (HYDRA-IBRAE/LM/V1.1) и FORTRAN (БЕРКУТ, DN3D). Пакет поставки включает в себя три исполняемых файла:

- самого программного комплекса ЕВКЛИД/V1;
- графической оболочки пользователя для задания исходных данных для выполнения расчётов;
- постпроцессора для обработки результатов расчётов.

Разработка автономных программных модулей и интегрального программного комплекса ЕВКЛИД/V1 проводилась в системе коллективной разработки SubVersion. Для упорядочивания работ и повышения качества программного обеспечения были сформулированы общие требования к структуре хранения данных под системой SubVersion и порядку оформления исходных текстов.

Представлены основные подходы к реализации в теплогидравлическом и твэльном программных модулях алгоритмов параллельных вычислений на основе технологии OpenMP.

Тестирование эффективности распараллеливания теплогидравлического модуля HYDRA-IBRAE/LM/V1.1 и твэльного модуля БЕРКУТ выполнено на вычислительных системах под управлением операционных систем семейств Linux и Windows на трёх задачах:

- выход на стационарный режим работы на номинальном уровне мощности РУ БРЕСТ-ОД-300;
- ввод полного запаса положительной реактивности путём извлечения из активной зоны всех РО СУЗ с максимальной проектной скоростью при работе РУ на номинальной мощности со срабатыванием защиты ГЦНА РУ БРЕСТ-ОД-300;
- выход на стационарный режим работы на номинальном уровне мощности РУ БН-1200.

Для обоих модулей показано, что операционная система Windows не обеспечивает высокой эффективности работы многопоточного приложения, что позволяет рекомендовать пользователям проводить расчёты ресурсозатратных задач на вычислительных системах, работающих под управлением операционных систем семейства Linux.

Показано, что ускорение твэльного модуля на 24 ядрах на вычислительной системе под управлением ОС семейства Linux близко к идеальному: параллельная эффективность составила 89,2 %. При этом параллельная эффективность твэльного модуля заметно выше, чем у теплогидравлического. По результатам тестирования теплогидравлического модуля было показано, что максимальное ускорение на 24-ядерном процессоре на вычислительной системе под управлением ОС семейства Linux составило около 9 раз.

5 Методика оценки погрешностей результатов расчётов, получаемых по программным комплексам

5.1 Вводные замечания по разделу 5

В связи с повышением роли расчётных обоснований в атомной энергетике, связанных с увеличением мощностей вычислительных систем, в том числе высокопроизводительных, развитием физико-математических моделей и методов численного решения, сделавших возможными в приемлемые сроки выполнять моделирование различных режимов работы объектов использования атомной энергии с проведением многовариантных расчётов, на повестку дня поставлен вопрос о необходимости оценки качества расчётных обоснований.

В разделе 5 представлена методика оценки погрешностей результатов расчёта параметров (откликов), получаемых с использованием программных комплексов, применяемых для обоснования безопасности объектов использования атомной энергии. Методика включает в себя оценку погрешностей на основе анализа неопределённостей, обусловленных точностью используемых моделей физических процессов, входных данных и вычислительных неопределённостей.

Методика опубликована в журнале «Вопросы радиационной безопасности» [159] и разработана непосредственно автором диссертационной работы совместно с к.ф.-м.н. Моисеенко Е.В. Отдельные положения методики опубликованы также в работе [26].

5.2 Методика оценки погрешностей результатов расчётов, получаемых по программным комплексам

При численном моделировании одним из основных этапов работы является оценка результатов расчётов, в частности, должна быть рассчитана и обоснована погрешность определения расчётных параметров [4, 160]. Отметим, что термин «погрешность» как отклонение расчётного значения от истинного, можно однозначно определить только для аналитического решения, поскольку в остальных случаях получить истинное значение рассматриваемой величины невозможно. Действительно, как для результатов экспериментов, так и для расчётов при помощи реперных прецизионных или аттестованных программных комплексов существует неопределённость, вызванная теми или иными факторами. Именно поэтому введенный в 2011 г. в России ГОСТ Р 54500.1-2011 предписывает использовать понятие «неопределённость измерений» вместо «погрешность измерений». Однако поскольку в РД-03-34-2000 [160] используется понятие погрешности, в данной диссертационной работе при

сравнении результатов расчётов с эталонными величинами и получении соответствующей численной оценки с учётом основных неопределённостей (включая неопределённости измерений, замыкающих соотношений, исходных данных) будет применяться термин «погрешность»: то есть итоговая величина, характеризующая отклонение расчётного значения от экспериментального или реперного, будет называться «погрешность», в остальных случаях будет использоваться термин «неопределённость».

Для получения погрешности результатов расчёта необходимо в общем случае оценить 5 основных источников неопределённостей [161]:

- 1) неопределённости моделей физических процессов;
- 2) неопределённости представления (дискретизации расчётной области) – вычислительные неопределённости;
- 3) неопределённости масштабирования (применение моделей, обоснованных на маломасштабных экспериментах, для реальных объектов);
- 4) неопределённости входных данных;
- 5) неопределённости, связанные с квалификацией пользователя.

Изложенный в данной методике подход включает в себя оценку неопределённостей, обусловленных точностью используемых моделей физических процессов и входных данных (пункты 1) и 4) из списка, приведённого выше). Вычислительные неопределённости (пункт 2) выше) минимизируются за счёт использования более детальных расчётных сеток и малых временных шагов. Неопределённости масштабирования и влияние квалификации пользователя (пункты 3) и 5) выше) в данной методике не учитываются, хотя для последних сформулированы рекомендации по их минимизации.

Оценку погрешностей результатов расчёта, полученных с использованием программных комплексов, обусловленных описанными выше тремя источниками неопределённостей, при моделировании экспериментов или аналитических задач, а также оценку неопределённостей для объектов использования атомной энергии (для которых эталонные экспериментальные результаты отсутствуют) предлагается проводить по следующему алгоритму.

а) Экспертно должны быть определены параметры, по отношению к которым потенциально наиболее чувствителен результат расчёта. Эти параметры могут быть связаны с неопределённостью измерения отдельных величин, используемых в качестве исходных данных при расчёте, неопределённостями эмпирических соотношений и прочими факторами. Затем должны быть определены границы области варьирования значений параметров и их функции

распределения. Обозначим выявленные параметры как $\mathbf{p}=\{p_1, p_2, \dots, p_k\}$, где k – общее число параметров.

б) Должны быть исключены вычислительные неопределённости за счёт использования детальных расчётных сеток и малых временных шагов. Для этого следует выполнить расчёты с некоторыми фиксированными значениями исходных данных на последовательности сеток и с использованием нескольких значений шага по времени, отличающихся в разы или на порядки (зависит от постановки конкретной задачи). Если полученные результаты оказываются близкими, то неопределённости, связанные с дискретизацией расчётной области, могут быть исключены из дальнейшего рассмотрения. Под близостью в данном случае понимается много меньший диапазон изменения расчётных значений по сравнению с полученным при описанных в пункте в) ниже многовариантных расчётах. Если получен значительный разброс результатов, то сетка и шаг по времени уменьшаются до тех пор, пока результаты не оказываются близкими.

в) Должны быть проведены многовариантные расчёты с использованием программного комплекса. Цель выполнения расчётов – получение информации о чувствительности отклика R анализируемой модели по отношению к вариации параметров модели и/или входных данных $\mathbf{p}=\{p_1, p_2, \dots, p_k\}$, определённых в пункте а), и оценка диапазона неопределённости отклика (m, M)

$$m = \min R(\mathbf{p}), \quad M = \max R(\mathbf{p}), \quad (5.1)$$

и среднего значения отклика $\bar{R}$.

Для оценки диапазона неопределённости отклика должен быть найден толерантный интервал $\{m_\alpha, M_\alpha\}$ отклика, соответствующий некоторой предопределённой доверительной вероятности α , так что:

$$P\{m_\alpha < R \leq M_\alpha\} = \alpha. \quad (5.2)$$

Левая (правая) границы толерантного интервала оцениваются как минимальное $m^{(n)}$ (максимальное $M^{(n)}$) выборочное значение отклика, где индекс 'n' указывает на объём выборки. Однако эти выборочные пределы являются случайными, так что выборочный интервал покрывает толерантный интервал с некоторой вероятностью β :

$$P\{(m_\alpha, M_\alpha) \subseteq (m^{(n)}, M^{(n)})\} = \beta. \quad (5.3)$$

Количество расчётов может быть определено из неравенства, полученного Уилксом [162], связывающего вероятности α и β с объёмом выборки для двухстороннего толерантного интервала:

$$\beta \leq 1 - n\alpha^{n-1} + (n-1)\alpha^n. \quad (5.4)$$

Уравнение (5.4) используется для нахождения минимального необходимого объёма n выборки для заданных значений вероятностей α и β .

В рамках статистической обработки результатов многовариантных расчётов определяются следующие величины:

1) максимальное выборочное значение M , являющееся оценкой верхней границы диапазона неопределённости результатов расчёта:

$$M = \max(R_1, R_2, \dots, R_n); \quad (5.5)$$

2) минимальное выборочное значение m , являющееся оценкой нижней границы диапазона неопределённости результатов расчёта:

$$m = \min(R_1, R_2, \dots, R_n); \quad (5.6)$$

3) среднее выборочное значение $\bar{R}$, являющееся оценкой математического ожидания результатов расчёта:

$$\bar{R} = \frac{R_1 + R_2 + \dots + R_n}{n}. \quad (5.7)$$

В формулах (5.5)–(5.7) R_i – отдельный численный результат i -го расчёта отклика R . Такой подход к анализу неопределённостей широко используется в мировой практике, например, в методике GRS [163].

В качестве меры чувствительности отклика к варьированию входных параметров могут использоваться нормированные коэффициенты многомерной линейной регрессии a_i , вычисляемые по методу, описанному в [164]. Используется разложение Тейлора для отклика в окрестности некоторой опорной точки $\mathbf{p}_0$:

$$R = R(\mathbf{p}_0) + \sum_{i=1}^k A_i^{(1)} (p_i - p_i^{(0)}) + \frac{1}{2} \sum_{ij=1}^k A_{ij}^{(2)} (p_i - p_i^{(0)}) (p_j - p_j^{(0)}) + \dots, \quad (5.8)$$

где A_i – коэффициенты чувствительности, определяемые как (5.9):

$$A_i^{(1)} \equiv \frac{\partial R(\mathbf{p}_0)}{\partial p_i}, A_{ij}^{(2)} \equiv \frac{\partial^2 R(\mathbf{p}_0)}{\partial p_i \partial p_j}. \quad (5.9)$$

За основу берётся линейная часть разложения (5.8).

Усреднённые коэффициенты чувствительности записываются в виде (5.10):

$$A_i = \int \frac{\partial R(\mathbf{p})}{\partial p_i} \cdot f(\mathbf{p}) \cdot d\mathbf{p}, i = 1, 2, \dots, k, \quad (5.10)$$

где интегрирование проводится по области определения параметров, а $f(\mathbf{p})$ – некоторая положительно определенная весовая функция, нормированная на 1: $\int f(\mathbf{p}) d\mathbf{p} = 1$. Формула (5.10) может рассматриваться как математическое ожидание (E) частных производных, зависящих от случайного вектора $\mathbf{p}$, причем $f(\mathbf{p})$ является плотностью распределения (5.11):

$$\bar{A}_i = E \frac{\partial R(\mathbf{p})}{\partial p_i}, \quad i = 1, 2, \dots, k. \quad (5.11)$$

Анализ проводится в рамках стохастического подхода, согласно которому сначала генерируется случайный набор параметров модели в соответствии с некоторой предопределённой плотностью распределения f . Вообще говоря, параметры можно рассматривать как стохастически независимые (в противном случае можно использовать стохастически независимые комбинации исходных параметров). После этого отклик модели рассчитывается для каждого случайного набора параметров, получая, тем самым, для отклика n -мерную случайную выборку.

Для дальнейшего рассмотрения удобно ввести центрированные нормализованные параметры (5.12):

$$r = \frac{R - ER}{\sigma_R}, \quad l_i = \frac{p_i - Ep_i}{\sigma_{p_i}}, \quad i = 1, 2, \dots, k, \quad (5.12)$$

где $\sigma_R = \sqrt{\mathbf{D}\mathbf{r}}$ – стандартное отклонение отклика, аналогично определяется σ_{p_i} . Тогда формула (5.11) примет вид (5.13):

$$\bar{a}_i = E \frac{\partial r(l)}{\partial l_i}, \quad i = 1, \dots, k, \quad (5.13)$$

где введены новые безразмерные коэффициенты чувствительности: $\bar{a}_i = \sigma_{p_i} \bar{A}_i / \sigma_R$.

Вместо непосредственной оценки интегралов (5.10) коэффициенты чувствительности находятся в рамках линейного регрессионного анализа, в котором отклик (безразмерный) r аппроксимируется линейной функцией (5.14):

$$r^* = \mathbf{a}^+ \mathbf{l}, \quad (5.14)$$

где $\mathbf{l}$ и $\mathbf{a}$ – $(k \times 1)$ –столбцы центрированных нормализованных параметров (смотреть соотношение (5.11)) и безразмерные коэффициенты регрессии соответственно, знак « $^+$ » означает транспонирование. Таким образом:

$$r = r^* + \varepsilon, \quad (5.15)$$

где ε – остаточный член с нулевым математическим ожиданием.

Коэффициенты регрессии находятся методом наименьших квадратов, минимизируя дисперсию остаточного члена (5.16):

$$\mathbf{D}\varepsilon = \mathbf{E}(r - r^*)^2 = \mathbf{E}(\mathbf{a}^+ \mathbf{l})^2 \Rightarrow \min. \quad (5.16)$$

Можно показать, что коэффициенты регрессии близки к коэффициентам чувствительности, введённым в (5.13):

$$a_i \approx \bar{a}_i. \quad (5.17)$$

Далее коэффициенты чувствительности будем обозначать a_i .

Удобно определить уровень дискриминации $\bar{a}$ для коэффициентов чувствительности, с тем чтобы их можно было надёжно ранжировать по вкладу в вариацию отклика. Для этой цели используется следующая формула:

$$\bar{a} = \sqrt{\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k a_i^2}. \quad (5.18)$$

Параметры классифицируются как «важные», если модули коэффициентов чувствительности заметно превышают величину $\bar{a}$ ($|a_i| \gg \bar{a}$), в противном случае параметры рассматриваются как «несущественные» при $|a_i| \ll \bar{a}$ или как «потенциально важные» при $|a_i| \approx \bar{a}$. При моделировании экспериментов коэффициенты чувствительности позволяют получить информацию о важности отдельных параметров для последующего её использования при проведении прикладных расчётов объектов использования атомной энергии для формирования обоснованного набора параметров из пункта а) выше. При проведении прикладных расчётов коэффициенты чувствительности дают возможность определить, модели каких именно процессов наиболее целесообразно дорабатывать для снижения неопределённостей результатов расчёта, что в итоге позволит снять излишний консерватизм при расчётном обосновании безопасности.

Поскольку коэффициенты чувствительности рассчитываются, используя матрицу регрессии, то они оценены с некоторой неопределённостью. Следует различать два вида неопределённостей — стохастическую и систематическую. Неопределённость первого вида связана с конечностью объёма выборки n и следует асимптотической зависимости $(n - k)^{-1/2}$, где k , как и ранее, число параметров. Кроме того, можно показать, что требование хорошей обусловленности уравнений метода наименьших квадратов предполагает неравенство $n \gg k^2$. Таким образом, объём выборки определяется, учитывая оба условия, с тем чтобы минимизировать результирующую стохастическую ошибку.

Неопределённость второго вида характеризует качество приближения линейной регрессии и может быть выражена через дисперсию частных производных отклика. Систематическая ошибка коэффициентов чувствительности оценивается как:

$$a^{(syst)} = \sqrt{\frac{2(1-d)}{k}}, \quad (5.19)$$

где $d = 1 - D\varepsilon$ – коэффициент детерминации. Она даёт представление о средней неопределённости коэффициентов чувствительности из-за нелинейности поверхности отклика. То есть, если абсолютная величина некоторого коэффициента чувствительности a_i сравнима с величиной систематической ошибки или меньше неё, то данный метод не позволяет судить о «важности» этого параметра и для этого требуется использовать другие методы, например, регрессию более высокого порядка или ранговые коэффициенты корреляции.

Следует отметить, что применение этого метода анализа чувствительности требует гладкости отклика R в диапазоне варьирования входных данных. О гладкости отклика можно судить по гистограмме выборки расчётных значений отклика R и по точечным диаграммам зависимости расчётных значений отклика R от значений отдельных входных параметров p_i . При наличии в выборке выбросов или выраженной кластеризации, а также в случае выраженной нелинейности отклика (то есть, если не выполняется неравенство $a^{(syst)} \ll \bar{a}$) использование коэффициентов многомерной линейной регрессии в качестве меры чувствительности отклика некорректно. В этом случае следует использовать коэффициенты ранговой корреляции Спирмена.

Основными результатами данного этапа с точки зрения анализа чувствительности являются рассчитанные значения коэффициентов чувствительности a_i , а с точки зрения анализа неопределённостей – минимальное m и максимальное M значения отклика, определяющие толерантный интервал отклика с заданной вероятностью, и среднее значение отклика R .

г) Указанные выше шаги осуществляются для всех типов расчётов, как верификационных, так и прикладных с целью обоснования безопасности объекта использования атомной энергии. При этом для верификационных расчётов, где требуется сравнение результатов расчётов с некими эталонными значениями, необходимо провести ещё ряд действий.

В первую очередь должны быть определены неопределённости экспериментальных данных, включая связанные с оцифровкой.

Неопределённость оцифровки для экспериментальных значений, представленных в виде точек на графике, оценивается как абсолютный размер экспериментальной точки. Для

экспериментов 60–80-х годов двадцатого века дополнительно должен быть оценен вклад в неопределённость, вносимый при простановке точек на масштабную-координатную чертёжную бумагу. Экспертно значение данной неопределённости рекомендуется принять равным 3 % от абсолютного значения экспериментальной величины. Общая неопределённость оцифровки оценивается как корень квадратный из суммы квадратов полученных значений.

Неопределённость оцифровки для экспериментальных значений, представленных на графике в виде сплошной кривой, оценивается как абсолютное значение максимальной толщины кривой. Вклад в неопределённость, вносимый при простановке точек на масштабную-координатную чертёжную бумагу (для экспериментов 60–80-х годов двадцатого века), экспертно рекомендуется принять равным 3 % от абсолютного среднего значения экспериментальной величины. Общая неопределённость оцифровки оценивается как корень квадратный из суммы квадратов полученных значений.

Поскольку в соответствии с РД-03-34-2000 [160] при обосновании возможности использования программного средства в заявленной области применения наряду со сравнением результатов расчётов по программному средству с экспериментальными данными допускается использование аттестованных в установленном порядке программных средств, то в этом случае неопределённости отдельных параметров должны быть взяты из аттестационного паспорта программного средства.

д) Для оценки погрешностей расчёта значений отклика системы, полученных с использованием программного комплекса, должны быть рассчитаны функционалы от решения, функциональные зависимости в точках, частях расчётной области.

Рассмотрим методы сравнения отдельных функционалов от решения. Наиболее простым случаем являются значения величин в точках наблюдения и интегральные величины.

Пусть $\bar{R}$ – среднее значение расчётной величины, определённое так, как описано в пункте в) выше, а u – эталонная величина, определённая в пункте г) выше (среднее значение экспериментальной величины с учётом неопределённостей). Тогда погрешность расчётной величины есть:

$$\varepsilon^A = |\bar{R} - u| \quad (5.20)$$

или

$$\varepsilon = \frac{|\bar{R} - u|}{|u|} \cdot 100\% . \quad (5.21)$$

Для сравнения набора однотипных данных для статических величин используется следующий подход. Пусть имеются измерения в некоторых отдельных точках. В этом случае согласно (5.20) и (5.21) необходимо рассчитать погрешности для отдельных данных и усреднить их (при прикладных расчётах рекомендуется в качестве итогового значения погрешности расчёта конкретного отклика указать максимальное из полученных значений).

Сравнение набора однотипных данных, описываемых временными зависимостями, проводится по следующему алгоритму. Пусть для динамического процесса значение некоторого параметра Y зависит от времени, при этом известен набор экспериментальных значений $Y_{\text{exp}}(t_i)$, $t = t_{\min} \dots t_{\max}$. При моделировании этого процесса программным комплексом с анализом неопределённостей описанным выше методом вследствие конечного размера расчётного шага для данной величины получается множество наборов $Y(t_{jk})$, где $j = 1..n$ – номер расчёта, $k = 1..m_j$ – номер шага j -го расчёта. При этом, вообще говоря, t_{jk} могут не совпадать для разных j при равных k и, более того, m_j могут также различаться. Пусть зависимость $Y_j(t)$ является кусочно-линейной интерполяцией j -го набора $Y(t_{jk})$, $k = 1..m_j$, при этом каждый кусок соответствует отрезку $[t_{jk}, t_{jk+1}]$, то есть, для каждой зависимости $Y_j(t)$ используется свой набор узлов интерполяции, соответствующий шагам j -го расчёта. Таким образом, результат каждого расчёта представлен в виде непрерывной зависимости от времени. Тогда, выбрав некоторый упорядоченный набор значений t'_k , $k=1..K$, $t_{\min} = t'_{k1}$, $t'_{kM} = t_{\max}$, иначе говоря, разбиение отрезка $[t_{\min}, t_{\max}]$, можно получить для каждого $Y_j(t)$ набор значений $Y_j(t'_k)$. То есть, для всех расчётов $Y_j(t)$ получим набор значений на единой сетке. Соответственно, для каждого t'_k можно найти среднее значение для расчётных величин $Y(t'_k)$:

$$Y(t'_k) = \frac{\sum_{j=1}^n Y_j(t'_k)}{n}. \quad (5.22)$$

Проведя в свою очередь кусочно-линейную интерполяцию для набора $Y(t'_k)$, получим непрерывную функцию $Y(t)$, $t = t_{\min} \dots t_{\max}$, которую можно приближённо рассматривать как среднее значение для многовариантных расчётов величины Y . Далее, пусть $Y_{\text{exp}}(t)$, $t = t_{\min} \dots t_{\max}$ – результат кусочно-линейной интерполяции для набора экспериментальных значений $Y_{\text{exp}}(t_i)$. Таким образом, мы представили в виде непрерывных функций как усреднённый результат многовариантных расчётов, так и экспериментальную зависимость от времени.

Тогда в качестве погрешности ε результатов расчёта, полученных по программному комплексу, используется следующая величина:

$$\varepsilon = \frac{\int_{t_{\min}}^{t_{\max}} |Y_{\text{exp}}(t) - Y(t)| dt}{\int_{t_{\min}}^{t_{\max}} |Y_{\text{exp}}(t)| dt}. \quad (5.23)$$

Для проведения анализа чувствительности в течение процесса должно быть выделено несколько моментов времени t''_l , $l = 1..N$, соответствующих некоторым характерным для процесса явлениям, таким как переход из одного режима в другой, либо квазистационарное состояние, и для каждого из них должны быть рассчитаны коэффициенты чувствительности описанным выше методом. Следует отметить, что для разных моментов времени t''_l значения коэффициентов чувствительности для одного и того же варьируемого параметра могут существенно различаться, так как на разных фазах процесса его влияние могло быть разным.

На рисунке 5.1 показаны описанные выше шаги использования методики оценки погрешностей результатов расчёта.

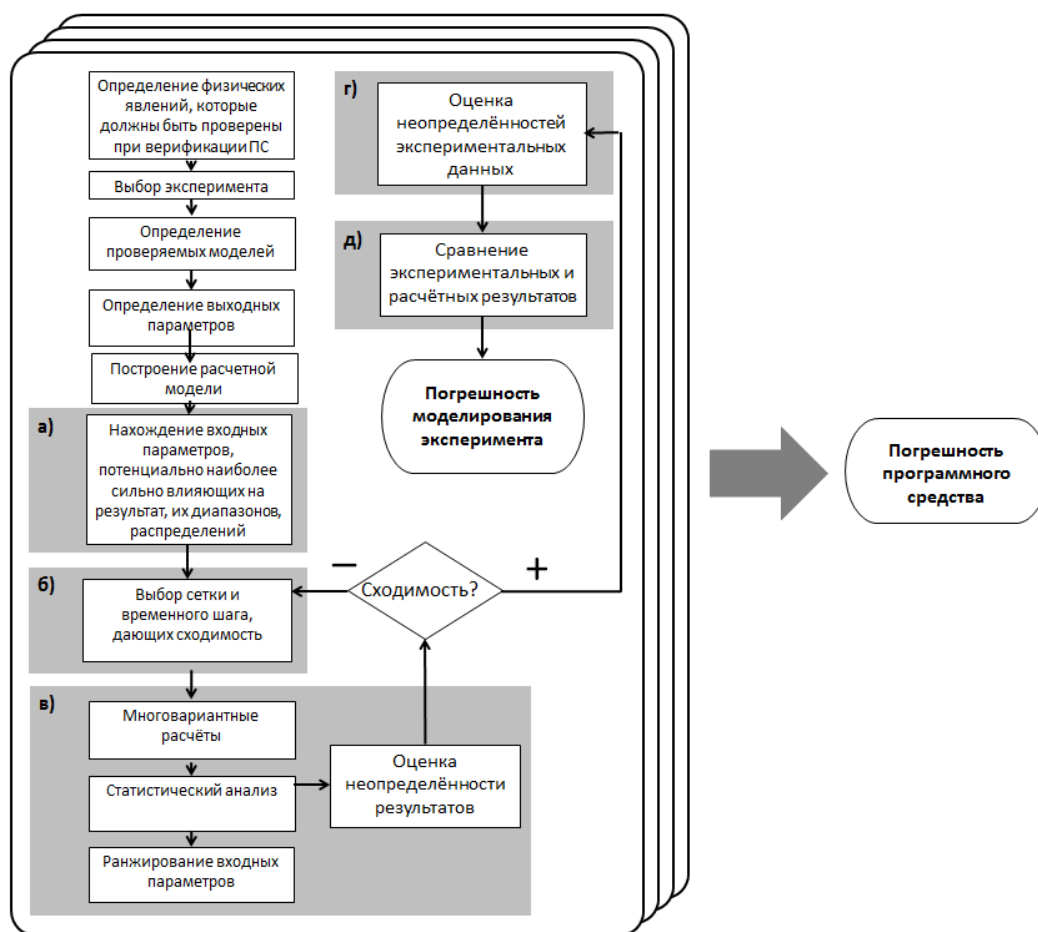


Рисунок 5.1 – Этапы методики оценки погрешностей результатов расчёта программного комплекса

Следует отметить, что по описанной выше методике можно оценить погрешность построенной на данном программном комплексе расчётной модели (нодализационной схемы) для моделирования рассматриваемого эксперимента.

Пространственное измельчение расчётной модели минимизирует неопределённости, связанные с конечным размером расчётных ячеек. При этом остаются неопределённости, связанные с подходом к выбору расчётной модели (нодализационной схемы) как таковой. Неопределённости такого рода практически невозможно выразить численно, поэтому они не учитываются в данной методике. При этом в рамках верификации могут и, вообще говоря, должны приводиться пояснения по выбору подхода к построению расчётной модели. В общем случае, должна быть проведена отдельная работа с анализом результатов, полученных для различных расчётных моделей, и выбором лучшей из них для описания рассматриваемых процессов и явлений. Сформулированные по итогам такой работы пояснения могут служить своего рода методическими рекомендациями пользователям кода. Если пользователи будут использовать те же подходы, что применялись при верификации, можно говорить о минимизации неопределённостей, связанных с выбором расчётной модели. По-видимому, на настоящий момент это единственный реалистичный способ их учёта.

На основании результатов выполненного анализа неопределённостей для экспериментов, аналитических задач, результатов кросс-верификационных расчётов можно сделать вывод о погрешностях результатов расчёта откликов системы по данному программному комплексу в диапазоне параметров, в котором выполнена верификация, если верифицируемое средство не является программным комплексом прямого численного моделирования. Следует отметить, что прямое перенесение полученных в результате верификации значений погрешностей расчёта откликов системы на объекты использования атомной энергии возможно в том случае, если неопределённости входных данных для экспериментов, по результатам которых получены значения погрешностей, и объекта использования атомной энергии близки, а также если эксперименты были выполнены на самом объекте использования атомной энергии или на экспериментальных стендах, подобие которых объекту использования атомной энергии обосновано.

Оценка погрешности результатов расчёта по программному средству аналитических тестов проводится аналогичным образом за исключением пункта г), который в данном случае исчезает. В формулах (5.20)–(5.21) в качестве u должно использоваться аналитическое или точное численное решение.

В случае прикладных расчётов инновационных объектов использования атомной энергии, для которых матрицы верификации не полны и существующие экспериментальные данные не позволяют оценить погрешности результатов расчёта во всем диапазоне режимных параметров, можно оценить только неопределённость по соотношениям

$$\psi^A = |M - m| \quad (5.24)$$

или

$$\psi = \frac{|M - m|}{|\bar{R}|} \cdot 100\%, \quad (5.25)$$

где M , m , $\bar{R}$ определяются соотношениями (5.5), (5.6) и (5.7) соответственно.

5.3 Заключительные и обобщающие замечания по разделу 5

В разделе 5 представлена методика оценки погрешностей результатов расчёта откликов системы по программным комплексам в случае моделирования аналитических задач и экспериментов или неопределённостей результатов расчётов при выполнении конкретных прикладных расчётов с целью обоснования безопасности объекта использования атомной энергии. Методика включает в себя оценку погрешностей на базе анализа неопределённостей, обусловленных точностью используемых моделей физических процессов, входных данных, и вычислительных неопределённостей. В методике не учитываются неопределённости масштабирования и влияние квалификации пользователя, хотя для последних сформулированы рекомендации по их минимизации.

Методика включает в себя пять основных этапов:

- а) определение параметров, по отношению к которым потенциально наиболее чувствителен результат расчёта;
- б) минимизация вычислительных неопределённостей за счёт использования более детальных расчётных сеток и малых значений временных шагов;
- в) проведение многовариантных расчётов, определение значений коэффициентов чувствительности, минимального и максимального значений отклика, определяющих толерантный интервал отклика с заданной вероятностью, и среднего значения отклика;
- г) определение неопределённостей экспериментальных данных или аттестованных программных средств (выполняется только в случае моделирования экспериментов или кросс-верификации с аттестованными программными средствами);
- д) численная оценка погрешностей или неопределённостей результатов расчёта.

Данная методика предназначена в первую очередь для оценки влияния на результат расчётного моделирования неопределённостей, связанных со случайным разбросом исходных данных (так называемых «aleatory uncertainties»). Эти неопределённости могут быть достаточно легко оценены численно, а оценки – использованы при генерации входных наборов для многовариантных расчётов. Вопрос о возможности применения методик подобного рода с учётом неопределённостей, вызванных недостатком знаний о моделируемых процессах (так называемые «epistemic uncertainties»), вообще говоря, остаётся открытым.

Следует отметить, что данный подход может быть применен в общем случае для любых программных комплексов. Однако в случае многомерных кодов его использование становится ресурсозатратным как в части требуемых вычислительных мощностей, так и времени, необходимого для выполнения набора расчётов.

Описанная в данной диссертационной работе методика может быть использована при актуализации требований к составу и содержанию отчётов по обоснованию безопасности объектов использования атомной энергии (пунктов хранения и захоронения РАО, блоков атомных станций с реакторами различных типов, установок ядерного топливного цикла и других объектов), включая требования к отчётам о верификации и обосновании программных средств.

С использованием данной методики выполнена верификация отдельных модулей и всего интегрального программного комплекса ЕВКЛИД/V1, а также расчёты режимов работы РУ БН-1200 и БРЕСТ-ОД-300 (описаны в разделах 6 и 7 данного диссертационного исследования).

6 Верификация программного комплекса ЕВКЛИД/V1

6.1 Вводные замечания к разделу 6

В разделе 6 представлены матрицы и результаты верификации интегрального программного комплекса ЕВКЛИД/V1 применительно к действующим и проектируемым РУ с натриевым теплоносителем и проектируемым реакторным установкам с тяжёлым жидкометаллическим теплоносителем.

Матрицы верификации определяют режимы работы ОИАЭ, моделируемые программным комплексом, список процессов и явлений, по отношению к которым должна проводиться верификация, и обобщают набор экспериментальных данных, аналитических тестов и расчётных тестов (кросс-верификация с аттестованными программными комплексами), которые использовались для верификации в заявленной области применимости. Для составления матрицы верификации в данной работе использовался признанный мировым сообществом приём по подготовке таблиц идентификации и ранжирования явлений (PIRT⁷). Цель составления PIRT – определение перечня и степени важности процессов и явлений, протекающих в исследуемом режиме работы ЯЭУ. Выбор явлений и процессов выполнялся отдельно для каждой фазы переходного процесса на уровне реакторной системы в целом и отдельно для каждого компонента системы. Явления и процессы, которые необходимо моделировать, определялись на основе анализа экспериментальных данных, опыта эксплуатации реакторных установок, экспертных оценок, а также расчётов с помощью программных комплексов.

В данном разделе понятие верификация используется в смысле определения, принятого в РД-03-34-2000⁸ [160], хотя в мировой практике, например, в сериях норм МАГАТЭ по безопасности [165], разделяют два понятия: верификация (проверка того, что физическая модель корректно реализована в виде компьютерного кода) и валидация (проверка того, что выбранная физическая модель корректно (адекватно) описывает поведение рассматриваемого объекта путём сравнения результатов расчётов с результатами экспериментов или натурных

⁷ PIRT – (англ. Phenomenon Identification and Ranking Table) таблица идентификации и ранжирования явлений.

⁸ Верификация ПС – обоснование возможности использования ПС в заявленной области применения и погрешности расчёта параметров путём сравнения с экспериментальными данными, расчётными данными, полученными по другим ПС, результатами аналитических тестов, теоретического анализа [160].

наблюдений). Тем не менее автор диссертационной работы будет придерживаться понятий, принятых в российских нормативных документах. При верификации интегрального программного комплекса ЕВКЛИД/V1 автор диссертационной работы и специалисты, выполнявшие верификацию, проводили её в соответствии с требованиями руководящего документа [160] и старались следовать рекомендациям, сформулированным в [165, 166]. В данном разделе приведены обобщённые результаты верификации интегрального программного комплекса на данных экспериментов.

Итоги выполненной верификации применительно к РУ с жидкометаллическими теплоносителями подтверждены в целом положительными результатами экспертизы верификационных отчётов по отдельным программным модулям и интегральному программному комплексу, выполненной экспертами, рекомендованными тематическими секциями Совета по аттестации программных средств при Ростехнадзоре (аттестационный паспорт теплогидравлического модуля [167]). В то же время экспертами отмечено недостаточное количество экспериментальных данных для тяжёлых жидкометаллических теплоносителей.

В части процессов, протекающих в пароводяном контуре реакторных установок на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем, в диссертационной работе приведены матрицы верификации и результаты верификации интегрального программного комплекса в пределах парогенератора.

Результаты исследований, представленные в данном разделе, получены под руководством и при непосредственном участии автора диссертационной работы и опубликованы в статьях [26, 40, 46, 168, 169], представлены на российских и международных конференциях [170–181], опубликованы в верификационных отчётах [28, 41, 42].

6.2 Матрица верификации применительно к действующим и проектируемым реакторным установкам с натриевым теплоносителем и проектируемым реакторным установкам со свинцовым или свинцово-висмутовым теплоносителем

Основными результатами расчётов реакторов на быстрых нейтронах с натриевым, свинцовым или свинцово-висмутовым теплоносителем с использованием интегрального программного комплекса ЕВКЛИД/V1 являются значения:

- давления, температуры, истинного объёмного паросодержания (для натриевого теплоносителя) или газосодержания (для свинцового или свинцово-висмутового

теплоносителей) жидкометаллического теплоносителя;

- давления, температуры и истинного объёмного паросодержания в водяном контуре;
- расхода теплоносителя при естественной и вынужденной циркуляции;
- температуры трубок парогенератора;
- температуры воздуха на выходе из воздушного теплообменника;
- температуры топлива и оболочки твэлов;
- радиальных, окружных и осевых напряжений в оболочке и топливной таблетке;
- доли выхода продуктов деления из топлива под оболочку твэла;
- изменения наружного диаметра твэла и топливной таблетки;
- внутреннего давления в твэле;
- трёхмерного распределения энерговыделения в а.з.

Так как ЕВКЛИД/V1 является интегральным программным комплексом, то ключевым фактором при его верификации является проведение интегральных расчётов, в которых осуществляется согласованное моделирование физических процессов связанными нейтронно-физическим, теплогидравлическим и твэльным модулями. При этом ограниченность данных по интегральным экспериментам требует особого подхода для решения данной задачи.

В коде ЕВКЛИД/V1 для моделирования РУ с тяжёлым жидкометаллическим или натриевым теплоносителем используются одни и те же базовые математические модели и приближения. Ключевые отличия при моделировании различных типов РУ заключаются в использовании различных данных по свойствам теплоносителей, библиотек ядерно-физических данных, карт режимов течения и в ряде случаев замыкающих соотношений. Таким образом, корректность моделирования взаимосвязанных нейтронно-физических и теплогидравлических процессов может быть обоснована на результатах расчётов экспериментальных режимов РУ БН-600, БН-800, БОР-60, корректность же моделирования отдельных групп физических процессов – на экспериментах по отдельным явлениям и интегральных экспериментах для конкретного типа топлива и теплоносителя.

Перечислим явления в РУ с натриевым и тяжёлым жидкометаллическим теплоносителем, корректность моделирования которых должна быть показана по итогам верификации.

В режимах нормальной эксплуатации, таких как работа реактора на номинальной мощности, пуск и останов РУ, переход с мощности на мощность, двухфазные режимы течения жидкометаллического теплоносителя в контурах РУ не реализуются. Номинальный режим работы реактора подразумевает постоянство расхода теплоносителя, мощности и пространственного энерговыделения в а.з. При останове и пуске реактора имеют место

изменения расхода теплоносителя и энерговыделения, которые также не сопровождаются процессами кипения теплоносителя. При останове реактора динамика протекающих процессов определяется величиной остаточного энерговыделения. Для перечисленных выше режимов важными процессами являются естественная и вынужденная конвекция теплоносителя.

В качестве основных событий, приводящих к нарушению нормальной эксплуатации (ННЭ), рассматриваются: останов главного циркуляционного насоса (ГЦН) первого и промежуточного (только для натриевого теплоносителя) контура, течи напорного трубопровода, ввод реактивности из-за незапланированного перемещения стержней системы управления и защиты (СУЗ), нарушения работы оборудования третьего контура, течи в парогенераторе (ПГ). Перечисленные исходные события сопровождаются нестационарными переходными процессами. Так, останов одного ГЦН первого контура вызывает падение расхода через одну из петель РУ. Это приводит к неравномерному подогреву теплоносителя в активной зоне (а.з.), неоднородному распределению температуры в верхней камере смешения и на входе в промежуточный теплообменник (ПТО) для установок с натриевым теплоносителем (парогенератор (ПГ) в случае тяжёлых жидкометаллических теплоносителей), а значит, и к различным подогревам теплоносителя в петлях промежуточного (для натриевого теплоносителя) и второго (для тяжёлого жидкометаллического теплоносителя) контуров. При незапланированном подъёме регулирующего стержня (РС) происходит неравномерный рост тепловыделения по радиусу а.з. Определяющим явлением в данном случае является теплообмен в условиях изменения теплового потока, вызванного эффектами реактивности. При нарушении подачи питательной воды или разрыве парового коллектора в реакторных установках с натриевым теплоносителем, возможен перегрев теплоносителя и, как следствие, его закипание. Течь воды в натрий в ПГ сопровождается протеканием интенсивной химической реакции с температурой в зоне реакции $1300\text{--}1400^{\circ}\text{C}$ и выделением газообразного водорода. Течь воды в тяжёлый жидкометаллический теплоноситель вызывает всплески давления внутри корпуса ПГ, в контуре циркуляции свинцового теплоносителя и в газовом объёме от момента разрыва теплообменных трубок до прекращения истечения пароводяной смеси. После попадания в свинцовый теплоноситель паровые образования (пузырьки) перемещаются по контуру и при определённых условиях могут попасть в а.з., что приведёт к вводу положительной реактивности и росту локального энерговыделения.

Для корректного описания проектных и запроектных аварий, в качестве которых для реакторных установок с натриевым теплоносителем рассматриваются аварии с частичной или полной блокировкой проходного сечения одной тепловыделяющей сборки (ТВС), с обесточиванием основных систем принудительной циркуляции теплоносителя при различном

сочетании отказов как систем аварийного отвода тепла (САОТ), так и систем аварийной защиты (АЗ) и другие, существенным становится корректное описание двухфазных режимов течения натриевого теплоносителя, включая кризис теплообмена.

Перечень процессов и явлений для РУ с натриевым и тяжёлым жидкометаллическим теплоносителем, корректность моделирования которых должна быть проверена по итогам верификации, был приведён в подразделе 1.5 диссертационной работы, поэтому здесь повторяться не будет.

Матрицы верификации отдельных модулей интегрального программного комплекса ЕВКЛИД/V1 применительно к действующим и проектируемым реакторным установкам с натриевым теплоносителем

Теплогидравлический модуль

В таблицах 6.1–6.5 представлена матрица верификации теплогидравлического модуля интегрального программного комплекса ЕВКЛИД/V1. Матрица включает в себя сопоставление представительных явлений и режимов работы РУ (таблица 6.1), представительных явлений и данных, полученных на реакторных установках БОР-60 и БН-600, а также экспериментальных стендах по исследованию отдельных явлений (в таблице 6.2 приведены ссылки на источники, из которых были взяты результаты экспериментальных исследований). В таблицах 6.3–6.5 представлены фрагменты матрицы верификации в части соотнесения аналитических тестов и представительных явлений. Матрица содержит 24 аналитических теста, среди которых:

- 3 теста по теплообмену излучением;
- 2 теста по теплопроводности в твёрдых телах;
- 5 тестов по процессам, протекающим с неконденсируемыми газами;
- 14 тестов по моделированию разнообразных процессов при течении натриевого теплоносителя в замкнутых контурах и каналах (проверка выполнения законов сохранения при течении теплоносителя в каналах, вынужденная и естественная циркуляция теплоносителя в замкнутых контурах, кипение и конденсация натрия, гидроудар, аксиальная теплопроводность, изменение свободных уровней при течении натрия).

Также в таблице 6.6 представлено сравнение результатов кросс-верификационных расчётов теплогидравлического модуля интегрального программного комплекса ЕВКЛИД/V1 и аттестованных кодов ТР-БН [182], BURAN [183] и PSFF [184].

Сопоставление экспериментальных стендов и установок приведено в таблице 6.7.

Таблица 6.1– Фрагмент матрицы верификации в части представительных явлений и режимов для действующих и проектируемых установок с реакторной установкой с натриевым теплоносителем

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Отношение явлений к режимам «+» – имеет место и является определяющим «0» – частично встречается «–» – отсутствует	Нормальная эксплуатация	Режимы нарушения нормальной эксплуатации							
							Запроектные аварии		
		Непредусмотренные перемещения стержней СУЗ	Режим с полной или частичной потерей принудительной циркуляции теплоносителя	Режимы с нарушением теплоотвода	Течь воды в натрий в ПГ	Проектные аварии	Авария с вводом положительной реактивности и несрабатыванием аварийной защиты реактора	Авария с потерей принудительной циркуляции теплоносителя и несрабатыванием аварийной защиты реактора	Авария с потерей нормальных и аварийных систем теплоотвода и несрабатыванием аварийной защиты реактора
Гидравлические потери давления на трение/местных сопротивлениях в основных участках контура циркуляции теплоносителя (однофазный режим)	+	0	+	+	+	+	+	+	+
Гидравлические потери давления на трение/местных сопротивлениях в основных участках контура циркуляции теплоносителя (двухфазный режим)	–	–	–	+	+	+	+	+	+
Перенос неконденсируемых газов	–	–	–	+	+	+	+	+	+

Продолжение таблицы 6.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Изменение параметров газовой полости компенсационного объёма	+	0	+	0	+	0	+	+	+
Теплообмен теплоносителя в основных участках контура циркуляции в однофазном режиме	+	+	+	+	0	+	+	+	+
Теплообмен теплоносителя в основных участках контура циркуляции в двухфазном режиме	–	–	–	+	0	+	0	0	0
Теплообмен неконденсируемых газов с теплоносителем	–	–	–	+	+	+	0	0	0
Аксиальная теплопроводность натриевого теплоносителя	+	–	+	+	–	+	0	0	0
Кипение натриевого теплоносителя	–	–	–	+	0	+	+	+	+
Конденсация натриевого теплоносителя	–	–	–	+	0	+	+	+	+
Теплообмен излучением	+	–	+	0	–	+	0	0	+
Сложный теплообмен (конвекция + излучение)	+	–	+	+	–	+	0	0	+

Продолжение таблицы 6.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Кризис теплообмена	–	–	–	–	0	+	+	+	+
Гидравлическая неустойчивость в а.з.	–	–	–	+	–	+	+	+	+
Радиальная/осевая теплопроводность в ТВЭЛе	+	+	+	+	–	+	+	+	+
Принудительная и естественная циркуляция теплоносителя в контурах РУ	+	0	+	0	–	+	+	+	+
Гидравлические процессы с размыканием контура циркуляции	–	–	+	+	0	+	–	–	–
Изменения уровней теплоносителя в баке реактора	+	0	+	0	–	+	+	+	+
Теплообмен в основном оборудовании РУ (а.з., ПТО, ПГ)	+	+	+	+	0	+	+	+	+
Теплообмен натрия с воздухом в системах аварийного отвода тепла	+	+	+	+	–	0	0	+	0

Продолжение таблицы 6.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Тепловые потери реактора, трубопроводов и оборудования второго контура	+	+	+	+	–	+	+	+	+
Выделение водорода и тепла при химическом взаимодействии натрия с водой	–	–	–	0	+	–	–	–	–
Растворение водорода в натрии	–	–	–	0	+	–	–	–	–
Распространение возмущений давления в контурах РУ	+	–	–	0	+	–	–	–	–
Теплообмен к пароводяной смеси в различных зонах ПГ	+	0	0	0	0	+	+	+	+
Гидравлическое сопротивление двухфазных пароводяных потоков	+	0	0	0	0	+	+	+	+

Таблица 6.2 – Фрагмент матрицы верификации, содержащий перечень экспериментальных установок и представительных явлений для действующих и проектируемых установок с реакторной установкой с натриевым теплоносителем

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Применимость данных «+» – применимы для проверки «0» – частично применимы для проверки «-» – не применимы для проверки	БОР-60 [183, 185–187]	БОР-60 (модель рабочего пакета реактора) [188]	БН-600 [189–193]	Стенд 6Б (ГНЦ РФ – ФЭИ, Россия), 217-стержневая сборка [194]	Стенд ЦКТИ (СССР), 7-стержневая сборка [195]	Стенд ЦКТИ (СССР), 127-стержневая сборка [196]	Стенд СПРУТ (ГНЦ РФ ФЭИ, Россия), модель с вынужденной циркуляцией воды [197–199]	Стенд СПРУТ (ГНЦ РФ ФЭИ, Россия), модель с ЕЦ воды [197–199]	Стенд ОИВТ РАН (СССР), круглая труба [200–201]	Стенд ML-4 (Италия, Ispra), круглая труба [202]	Стенд ML-4 (Италия, Ispra), 12-стержневая сборка [203 – 205]	Стенд SIENA (Япония, O-Arai) [206]	Стенд KNS (Германия, Karlsruhe), кольцевой канал [207]	Стенд KNS (Германия, Karlsruhe), 7-стержневая сборка [208]	Стенд FFM (США, ORNL), 19-стержневая сборка [209]	Стенд THORS (США, ORNL), 19-стержневая сборка [210 – 211]	Стенд МЭИ (НИУ «МЭИ», (Россия), круглая труба [212]	Стенд АО «ГНЦ РФ-ФЭИ» (Россия) [213 – 214]	Королевский технологический институт Стокгольма (Швеция) [215]	Установка для эксперимента Беннета [216]	Стенд ЭВТУС АО «ГНЦ РФ-ФЭИ», (Россия) [217]	Стенд ВТИ (ОАО «НПО ЦКТИ», Россия), [218– 221]
Гидравлические потери давления на трение/местных сопротивлениях в основных участках контура циркуляции теплоносителя (однофазный режим)	–	–	+	+	–	–	–	–	–	+	+	0	0	0	0	–	–	–	–	–	–	–

Продолжение таблицы 6.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Гидравлические потери давления на трение/местных сопротивлениях в основных участках контура циркуляции теплоносителя (двухфазный режим)	–	–	–	–	–	–	–	–	+	+	+	0	0	0	–	–	–	–	–	–	–	–
Перенос неконденсируемых газов	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Изменение параметров газовой полости компенсационного объёма	–	–	0	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Теплообмен теплоносителя в основных участках контура циркуляции в однофазном режиме	+	–	+	–	+	–	+	+	–	–	–	+	+	+	+	+	–	–	–	–	–	–
Теплообмен теплоносителя в основных участках контура циркуляции в двухфазном режиме	–	–	–	–	–	–	0	0	+	–	–	+	+	+	–	+	–	–	–	–	–	–

Продолжение таблицы 6.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Теплообмен неконденсируемых газов с теплоносителем	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Аксиальная теплопроводность натриевого теплоносителя	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Кипение натриевого теплоносителя	–	–	–	–	–	–	–	–	+	+	+	–	+	+	+	+	–	–	–	–	–	–
Конденсация натриевого теплоносителя	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0	0	–	+	+	–	0	–	–	–	–	–	–
Теплообмен излучением	–	+	+	+	–	+	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Сложный теплообмен (конвекция + излучение)	–	+	0	–	–	+	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Кризис теплообмена	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0	0	–	0	0		+	–	–	–	–	–	–
Гидравлическая неустойчивость в а.з.	–	–	–	–	–	–	–	–	–	+	+	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Радиальная/осевая теплопроводность в твэле	–	–	–	–	–	–	0	–	–	–	–	–	+	+	–	–	–	–	–	–	–	–

Продолжение таблицы 6.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Принудительная и естественная циркуляция теплоносителя в контурах РУ	–	–	+	–	–	–	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	–	–	–	–	–	–
Гидравлические процессы с размыканием контура циркуляции	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Изменения уровней теплоносителя в баке реактора	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Теплообмен в основном оборудовании РУ (а.з., ПТО, ПГ)	+	–	+	–	0	–	+	+	–	–	–	+	–	–	–	–	–	+	+	+	–	–
Теплообмен натрия с воздухом в системах аварийного отвода тепла	+	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–

Продолжение таблицы 6.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Тепловые потери реактора, трубопроводов и оборудования второго контура	–	–	+	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Выделение водорода и тепла при химическом взаимодействии натрия с водой	–	–	+	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Растворение водорода в натрии	–	–	+	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Распространение возмущений давления в теплоносителе	–	–	0	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Теплообмен к пароводяной смеси в различных зонах ПГ	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	+	+	+	+	+	–

Продолжение таблицы 6.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Гидравлическое сопротивление двухфазных пароводяных потоков	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	+	+

Таблица 6.3 – Фрагмент матрицы верификации, содержащий перечень аналитических тестов и представительных явлений для действующих и проектируемых установок с реакторной установкой с натриевым теплоносителем. Часть 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Применимость данных «+» – применимы для проверки «0» – частично применимы для проверки «–» – не применимы для проверки	Течение однофазного натриевого теплоносителя в горизонтальном канале. Проверка сохранения энергии	Изотермическое однофазное течение натриевого теплоносителя в горизонтальном канале с учётом механического трения о стенки канала. Проверка сохранения импульса	Установление температуры по длине канала с адиабатными стенками при течении теплоносителя с постоянной скоростью и при линейном законе снижения скорости теплоносителя	Аксиальный перенос тепла в покоящемся теплоносителе в стационарном режиме	Эволюция температуры теплоносителя в условиях снижения расхода при наличии теплообмена со стенкой	Радиационный теплоперенос между параллельными пластинами	Радиационный теплоперенос между коаксиальными цилиндрами	Излучательный теплоперенос в системе трёх поверхностей (задача трёх тел) для сборки
Гидравлические потери давления на трение/местных	–	+	–	–	–	–	–	–

Продолжение таблицы 6.3

1	2	3	4	5	6	7	8	9
сопротивлениях в основных участках контура циркуляции теплоносителя (однофазный режим)								
Теплообмен теплоносителя в основных участках контура циркуляции в однофазном режиме	+	–	+	–	+	–	–	–
Аксиальная теплопроводность натриевого теплоносителя	–	–	–	+	–	–	–	–
Теплообмен излучением	–	–	–	–	–	+	+	+

Таблица 6.4 – Фрагмент матрицы верификации, содержащий перечень аналитических тестов и представительные явления для действующих и проектируемых установок с реакторной установкой с натриевым теплоносителем. Часть 2

1	2	3	4	5	6
Применимость данных «+» – применимы для проверки «0» – частично применимы для проверки «–» – не применимы для проверки	Замкнутая гидравлическая сеть из трёх параллельных веток с насосом	Замкнутая гидравлическая сеть из трёх параллельных веток с двумя насосами с общей напорной камерой (по одному насосу в двух ветках)	Замкнутый контур с естественной циркуляцией теплоносителя	Замкнутый контур с теплообменниками и естественной циркуляцией теплоносителя	Замкнутая гидравлическая сеть из трёх параллельных веток с теплообменниками и естественной циркуляцией теплоносителя (две ветки с подъёмным и одна ветка с опускным движением теплоносителя)
Гидравлические потери давления на трение/местных сопротивлениях в основных участках контура циркуляции теплоносителя (однофазный режим)	+	+	–	–	–

Продолжение таблицы 6.4

1	2	3	4	5	6
Теплообмен теплоносителя в основных участках контура циркуляции в однофазном режиме	–	–	–	+	+
Принудительная и естественная циркуляция теплоносителя в контурах РУ	–	–	+	+	+

Таблица 6.5 – Фрагмент матрицы верификации, содержащий перечень аналитических тестов и представительные явления для действующих и проектируемых установок с реакторной установкой с натриевым теплоносителем. Часть 3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Применимость данных «+» – применимы для проверки «0» – частично применимы для проверки «–» – не применимы для проверки	Малые колебания давления в газовом объёме в открытой трубе	Всплытие водородного пузыря в открытой/заглушенной трубе с натрием без учёта теплообмена	Подъём и опускание уровня в открытой/заглушенной трубе	Теплообмен газового водородного пузыря с окружающей жидкостью	Растворение водорода в жидком натрии при течении в трубе	Замкнутый контур со свободными уровнями жидкости	Задача об изменении свободных уровней при переливе теплоносителя между сообщающимися сосудами	Моделирование гидравлического удара при быстром закрытии клапана	Изменение паросодержания по длине канала при кипении и конденсации в условиях стационарного течения теплоносителя	Теплопроводность в цилиндре с граничными условиями первого, второго и третьего рода	Теплопроводность в двухслойном цилиндре с граничным условием третьего рода
Перенос неконденсируемых газов	–	+	–	–	–	–	–	–	–	–	–

Продолжение таблицы 6.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Изменение параметров газовой полости компенсационного объёма	–	–	+	–	–	–	–	–	–	–	–
Теплообмен неконденсируемых газов с теплоносителем	–	–	–	+	–	–	–	–	–	–	–
Кипение натриевого теплоносителя	–	–	–	–	–	–	–	–	+	–	–
Конденсация натриевого теплоносителя	–	–	–	–	–	–	–	+	+	–	–
Радиальная/осевая теплопроводность в твэле	–	–	–	–	–	–	–	–	–	+	+
Гидравлические процессы с размыканием контура циркуляции	–	–	–	–	–	+	+	–	–	–	–
Изменения уровней теплоносителя в баке реактора	–	–	+	–	–	+	+	–	–	–	–
Теплообмен в основном оборудовании РУ (а.з., ПТО, ПГ)	–	–	–	–	–	–	–	–	–	+	–

Продолжение таблицы 6.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Тепловые потери реактора, трубопроводов и оборудования второго контура	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	+
Растворение водорода в натрии	–	–	–	–	+	–	–	–	–	–	–
Распространение возмущений давления в контурах РУ	+	–	–	–	–	–	–	+	–	–	–

Таблица 6.6 – Фрагмент матрицы верификации с результатами кросс-верификационных расчётов с аттестованными кодами

1	2	3	4
Применимость данных «+» – применимы для проверки «0» – частично применимы для проверки «–» – не применимы для проверки	Кросс-верификация с кодом ТР-БН процессов теплопередачи в ПГ типа БН в стационарных режимах	Кросс-верификация с кодом BURAN процессов теплопередачи в ПГ типа БН в стационарных режимах	Кросс-верификационные расчёты с аттестованным кодом PSFF системы аварийного расхолаживания через воздушный теплообменник РУ БН-600
Гидравлические потери давления на трение/местных сопротивлениях в основных участках контура циркуляции теплоносителя (однофазный режим)	–	–	+

Продолжение таблицы 6.6

1	2	3	4
Гидравлические потери давления на трение/местных сопротивлениях в основных участках контура циркуляции теплоносителя (двухфазный режим)	—	—	—
Перенос неконденсируемых газов	—	—	—
Изменение параметров газовой полости компенсационного объёма	—	—	—
Теплообмен теплоносителя в основных участках контура циркуляции в однофазном режиме	+	+	—
Теплообмен теплоносителя в основных участках контура циркуляции в двухфазном режиме	—	—	—
Теплообмен неконденсируемых газов с теплоносителем	—	—	—
Аксиальная теплопроводность натриевого теплоносителя	—	—	—
Кипение натриевого теплоносителя	—	—	—
Конденсация натриевого теплоносителя	—	—	—
Теплообмен излучением	—	—	—
Сложный теплообмен (конвекция + излучение)	—	—	—
Кризис теплообмена	—	—	—
Гидравлическая неустойчивость в а.з.	—	—	—
Радиальная/осевая теплопроводность в твэле	—	—	—

Продолжение таблицы 6.6

1	2	3	4
Принудительная и естественная циркуляция теплоносителя в контурах РУ	–	–	–
Гидравлические процессы с размыканием контура циркуляции	–	–	–
Изменения уровней теплоносителя в баке реактора	–	–	–
Теплообмен в основном оборудовании РУ (а.з., ПТО, ПГ)	+	+	–
Теплообмен натрия с воздухом в системах аварийного отвода тепла	–	–	–
Тепловые потери реактора, трубопроводов и оборудования второго контура	–	–	–
Выделение водорода и тепла при химическом взаимодействии натрия с водой	–	–	–
Растворение водорода в натрии	–	–	–
Распространение возмущений давления в контурах РУ	–	–	–
Теплообмен к пароводяной смеси в различных зонах ПГ	–	–	–
Гидравлическое сопротивление двухфазных пароводяных потоков	–	–	–

Таблица 6.7 – Фрагмент матрицы верификации, содержащий сопоставление экспериментальных установок и режимов работы

для действующих и проектируемых установок с реакторной установкой с натриевым теплоносителем

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Воспроизводимость режимов на стенде «+» – воспроизведены «0» – ограничено воспроизведены «-» – не воспроизведены	Нормальная эксплуатация	Режимы нарушения нормальной эксплуатации							
						Проект- ные аварии	Запроектные аварии		
		Режим с вводом реактивности	Режим с полной или частичной потерей принудительной циркуляции теплоносителя	Режим с нарушением теплоотвода	Течь воды в натрий в ПГ		Авария с вводом положительной реактивности и несрабатыванием аварийной защиты реактора	Авария с потерей принудительной циркуляции теплоносителя и	Авария с потерей нормальных и аварийных систем теплоотвода и
БОР-60	+	-	-	-	-	+	-	-	-
БОР-60 (модель рабочего пакета реактора)	+	-	-	-	-	-	-	-	-
БН-600	+	0	+	-	+	-	-	-	-

Продолжение таблицы 6.7

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Стенд 6Б (АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», Россия), 217-стержневая сборка	+	0	0	0	0	–	–	–	–
Стенд ЦКТИ (СССР), 7-стержневая сборка	+	0	0	–	–	–	–	–	–
Стенд ЦКТИ (СССР), 127-стержневая сборка	–	0	0	–	–	–	–	–	–
Стенд СПРУТ (АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», Россия), модель с вынужденной циркуляцией воды	+	–	–	0	–	+	–	–	–
Стенд СПРУТ (ГНЦ РФ ФЭИ, Россия), модель с ЕЦ воды	+	–	–	0	–	–	–	–	–
Стенд ОИВТ РАН (СССР), круглая труба	–	–	–	–	–	0	+	+	0
Стенд ML-4 (Италия, Ispra), круглая труба	+	+	+	0	–	0	+	+	0
Стенд ML-4 (Италия, Ispra), 12-стержневая сборка	+	+	+	0	–	0	+	+	0
Стенд SIENA (Япония, O-Arai), 19-стержневая сборка	–	0	+	–	–	+	+	+	0
Стенд KNS (Германия, Karlsruhe), кольцевой канал	–	0	+	0	–	+	+	+	+
Стенд KNS (Германия, Karlsruhe), 7-стержневая сборка	–	0	+	0	–	+	+	+	+
Стенд FFM (США, ORNL), 19-стержневая сборка	+	+	+	0	–	–	–	–	–
Стенд THORS (США, ORNL), 19-стержневая сборка	–	0	+	+	–	+	–	–	+
Стенд АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» (Россия)	+	0	0	+	–	0	0	0	0
Стенд МЭИ (НИУ «МЭИ», (Россия)	+	0	0	+	–	0	0	0	0
Стенд ЭВТУС (АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», Россия)	+	0	0	+	–	0	0	0	0
Королевский технологический институт Стокгольма (Швеция)	+	0	0	+	–	0	0	0	0
Установка для эксперимента Беннета	+	0	0	+	–	0	0	0	0
Стенд ВТИ (ОАО «НПО ЦКТИ», Россия), круглая труба	+	0	0	–	–	0	0	0	0

Нейтронно-физический модуль

Проведение автономных расчётов с применением нейтронно-физического модуля кода ЕВКЛИД/V1 позволяет обосновать корректность реализованных в модуле математических моделей, разностных схем и приближений, а также оценить погрешность вычислений нейтронно-физических параметров.

Для обоснования корректности нейтронно-физических расчётов РУ с натриевым теплоносителем матрица верификации содержит результаты нейтронно-физических измерений на критических сборках БФС, расчётные и экспериментальные результаты бенчмарков, включая международные, созданные под эгидой МАГАТЭ.

Полный перечень экспериментов и расчётных тестов, включённых в матрицу верификации нейтронно-физического модуля кода ЕВКЛИД/V1 применительно к действующим и проектируемым РУ с натриевым теплоносителем, представлен в таблице 6.8.

Таблица 6.8 – Эксперименты и расчётные тесты для верификации нейтронно-физического модуля кода ЕВКЛИД/V1 применительно к действующим и проектируемым реакторным установкам с натриевым теплоносителем

Эксперимент / Расчёт	№
Результаты нейтронно-физических измерений на критических сборках БФС. БФС-44	Э1
Результаты нейтронно-физических измерений на критических сборках БФС. БФС-54	Э2
Результаты нейтронно-физических измерений на критических сборках БФС. БФС-56	Э3
Результаты нейтронно-физических измерений на критических сборках БФС. БФС-58	Э4
Измерения распределения энерговыделения в а.з. РУ БН-600	Э5
Бенчмарк по расчётам модели гибридной активной зоны реактора БН-600 [222]	Б1
Бенчмарк по расчётам модели активной зоны реактора БН-600 с МОХ-топливом [223]	Б2

Матрица верификации нейтронно-физического модуля интегрального программного комплекса ЕВКЛИД/V1 представлена в таблице 6.9, в которой для каждого эксперимента и теста из таблицы 6.8 с помощью знака «+» обозначается наличие данных, относящихся к конкретным физическим явлениям.

[illegible]

Продолжение таблицы 6.9

Параметр	Условия эксплуатации (режимы)													
	Стационарное состояние на энергетическом уровне мощности													
	Э1	Э2	Э3	Э4	Э5	Б1	Б2	Б3	Б4	Б5	Б6	Б7	Б8	К1
Коэффициент реактивности по температуре теплоносителя	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	+	–	–
Коэффициент реактивности по температуре топлива	–	–	–	–	–	+	+	–	–	+	–	+	–	–
Эффективная доля запаздывающих нейтронов	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	+
Мощность энерговыделения ТВС в активной зоне	–	–	–	–	+	+	+	+	+	+	+	–	+	+
Мощность энерговыделения ТВС в зоне воспроизводства	–	–	–	–	+	–	–	+	+	–	–	–	+	–
Кинетическая опция (для критических сборок с натриевым теплоносителем и МОХ-топливом)														
Эффективный коэффициент размножения	–	–	+	+	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Натриевый пустотный эффект реактивности	–	–	+	+	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Эффективная доля запаздывающих нейтронов	–	–	+	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–

Твэльный модуль

В таблице 6.10 представлен перечень аналитических и расчётных тестов, данных экспериментов и явлений и процессов, протекающих в твэле. Верификация деформационного и температурного модулей твэльного модуля проведена на задачах с аналитическим решением, также выполнена кросс-верификация деформационного модуля с конечно-элементной программой MSC.MARC [230].

Модуль расчёта выгорания

Модуль расчёта выгорания BPS имеет дело с расчётной ячейкой реактора, используя в качестве входных параметров плотность потока нейтронов и сечения взаимодействия нейтронов с веществом в этой ячейке, имеющей опосредованное отношение к самому реактору, поэтому погрешность расчёта модулем BPS слабо зависит от вида реактора и связана лишь с учётом зависимости выхода продуктов деления от энергии налетающего нейтрона.

Для верификации использовались экспериментальные и расчётные данные как с урановым, так и со смешанным оксидным и нитридным уран-плутониевым топливом. Результаты использования МОКС топлива в реакторе БН-350 представлены в работе [231]. Изменение вида топлива никак не отражается на алгоритмах расчёта выгорания и их сходимости. В таблице 6.11 представлена информация для уранового, смешанного оксидного и нитридного уран-плутониевого топлива.

Таблица 6.11 – Матрица верификации модуля расчёта выгорания BPS

Параметр	Сравнение с экспериментальными данными	Сравнение с тестовым расчётом
Выгорание топлива	+, [232], [233]	+, [232]
Концентрации нуклидов при выгорании	+, [232], [233]	+, [232]

Модуль расчёта остаточного энерговыделения

Модуль расчёта остаточного энерговыделения, как и модуль расчёта выгорания, имеет дело с расчётной ячейкой реактора. В качестве входных данных используются только концентрации нуклидов в расчётной ячейке, поэтому погрешность расчёта модулем OSTB не зависит от вида реактора. В таблице 6.12 представлена матрица верификации модуля расчёта остаточного энерговыделения.

Таблица 6.12 – Матрица верификации модуля расчёта остаточного энерговыделения OSTB

Параметр	Сравнение с тестовым расчётом	Сравнение с экспериментальными данными
Мощность остаточного энерговыделения, Вт	+, [232], [234–236]	+, [237 – 243]

Матрицы верификации отдельных модулей интегрального программного комплекса ЕВКЛИД/V1 применительно к проектируемым реакторным установкам с тяжёлым жидкометаллическим теплоносителем

Теплогидравлический модуль

В таблицах 6.13–6.16 представлена матрица верификации теплогидравлического модуля интегрального программного комплекса ЕВКЛИД/V1 применительно к проектируемым установкам с реакторной установкой со свинцовым или свинцово-висмутовым теплоносителем. В таблице 6.13 представлен фрагмент матрицы верификации с представительными явлениями и режимами. Перечень экспериментальных установок приведён в таблице 6.14 со ссылками на источники, в которых опубликованы результаты экспериментальных исследований. В столбцах таблицы 6.16 представлен перечень аналитических тестов, на которых проводилось обоснование применимости теплогидравлического модуля для моделирования процессов и явлений из матрицы верификации.

Таблица 6.13 – Фрагмент матрицы верификации в части представительных явлений и режимов проектируемых установок с реакторной установкой со свинцовым или свинцово-висмутовым теплоносителем

Явления/Режимы работы «+» – имеет место и является определяющим «0» – частично встречается «–» – отсутствует	Режимы нормальной эксплуатации	Режимы нарушения нормальной эксплуатации					
		Несанкционированное изменение реактивности	Нарушение теплоотвода от активной зоны	Изменение давления в газовой полости реакторного блока	Уменьшение отвода тепла вторым контуром	Избыточный отвод тепла вторым контуром	Нарушения при обращении с ядерным топливом
Гидравлическое сопротивление тяжёлого жидкого металла в обогреваемых и необогреваемых каналах простой формы	+	+	+	+	+	+	–
Гидравлическое сопротивление ТЖМ в обогреваемых и необогреваемых пучках (треугольная упаковка), в том числе, при наличии дистанционирующей решётки	+	+	+	+	+	+	+
Гидравлическое сопротивление при обтекании змеевиковых пучков	+	+	+	+	+	+	–
Гидравлическое сопротивление двухфазных пароводяных потоков	+	+	+	+	+	+	–
Радиальная и осевая теплопроводность в твэле и конструкциях	+	+	+	+	+	+	+

Продолжение таблицы 6.13

Явления/Режимы работы «+» – имеет место и является определяющим «0» – частично встречается «–» – отсутствует	Режимы нормальной эксплуатации	Режимы нарушения нормальной эксплуатации					
		Несанкционированное изменение реактивности	Нарушение теплоотвода от активной зоны	Изменение давления в газовой полости реакторного блока	Уменьшение отвода тепла вторым контуром	Избыточный отвод тепла вторым контуром	Нарушения при обращении с ядерным топливом
Теплообмен тяжёлого жидкого металла в каналах простой формы	+	+	+	+	+	+	–
Теплообмен при обтекании тяжёлым жидким металлом змеевиков	+	+	+	+	+	+	–
Теплообмен ТЖМ в пучках гладких твэлов, в том числе при наличии дистанционирующей решетки (треугольная упаковка)	+	+	+	+	+	+	+
Теплообмен к пароводяной смеси в различных зонах прямоточного змеевикового ПГ	+	+	+	+	+	+	–
Лучистый теплообмен со свободной поверхности ТЖМ	0	0	0	0	0	0	0

Продолжение таблицы 6.13

Явления/Режимы работы «+» – имеет место и является определяющим «0» – частично встречается «–» – отсутствует	Режимы нормальной эксплуатации	Режимы нарушения нормальной эксплуатации					
		Несанкционированное изменение реактивности	Нарушение теплоотвода от активной зоны	Изменение давления в газовой полости реакторного блока	Уменьшение отвода тепла вторым контуром	Избыточный отвод тепла вторым контуром	Нарушения при обращении с ядерным топливом
Теплоотдача к воздуху в теплообменнике САОР	0	0	+	+	+	+	–
Теплообмен в теплоизолирующем зазоре опускного участка ПГ	+	+	+	+	+	+	–
Изменения уровней теплоносителя в газовом объеме, УПОС и др. элементах	+	+	+	+	+	+	–
Истечение пароводяной смеси в поток ТЖМ	–	–	–	+	–	–	–
Движение паровых образований в потоке ТЖМ	–	–	–	+	–	–	–
Импульс давления и его распространение по контуру РУ при образовании межконтурной течи парогенератора	–	–	–	+	–	–	–
Теплообмен в присутствии пароводяной смеси в теплоносителе первого контура	–	–	–	+	–	–	–
Естественная и вынужденная конвекция теплоносителя в больших полостях	0	+	+	0	0	0	–

Таблица 6.14 – Фрагмент матрицы верификации, содержащий перечень экспериментальных установок и представительных явлений для проектируемых установок с реакторной установкой со свинцовым или свинцово-висмутовым теплоносителем

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
	Экспериментальные установки																						
На пересечении строк и столбцов: «+» – применимы для проверки «0» – частично применимы для проверки «–» – не применимы для проверки Явления	HELIOS (Южная Корея), интегральный стенд [244]	TALL (Швеция), прямоточный теплообменник (круглая труба) [245]	TALL (Швеция), имитатор твэла (кольцевой зазор) [246]	TALL (Швеция), интегральный стенд [247, 248]	СПРУТ (АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», Россия), модель прямоточного парогенератора [249 – 252]	LIFUS 5 (Италия), интегральный стенд [253]	Стенд АО «ГНЦ РФ-ФЭИ», (Россия) [213–214]	Стенд ВТИ (ОАО «НПО ЦКТИ», Россия), круглая труба [254 – 255]	Стенд ИТ СО РАН (Россия), круглая труба [256]	Стенд ЦКТИ (СССР), пучки труб с продольным обтеканием [257–258]	Стенд ЦКТИ (СССР), пучки труб с поперечным обтеканием [258]	THEADES (Германия), пучок труб с продольным обтеканием [259]	Стенд ЭУСТ (АО «НИКИЭТ», Россия), модель теплообменника САОР (кольцевой зазор) [260 – 263]	Стенд БРЕСТ-3 (АО «НИКИЭТ», Россия), модель опускного участка ПГ РУ БРЕСТ-ОД-300 [264 – 268]	Стенд МЭИ (НИУ «МЭИ», (Россия), круглая труба [212]	Стенд ЭВТУС АО «ГНЦ РФ-ФЭИ» (Россия) [217]	Королевский технологический институт Стокгольма (Швеция) [215]	Установка для эксперимента Беннета [216]	Стенд АО «ЭНИЦ» [269]	Стенд ЦКТИ по критическому истечению [270]	Стенд ВТИ по критическому истечению [218–221]	Проливка ТВС РУ БРЕСТ-ОД-300, стенд ЭУСТ АО «НИКИЭТ» [271]	Эксперименты с уровнем, стенд АО «НИКИЭТ» [272]
Гидравлическое сопротивление тяжёлого жидкого металла в обогреваемых и необогреваемых каналах простой формы	+	+	–	+	–	–	–	–	0	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–

Продолжение таблицы 6.14

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Гидравлическое сопротивление ТЖМ в обогреваемых и необогреваемых пучках (треугольная упаковка), в том числе, при наличии дистанционирующей решётки	0	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	+	–
Гидравлическое сопротивление при обтекании змеевиковых пучков	–	–	–	–	+	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Гидравлическое сопротивление двухфазных пароводяных потоков	–	–	–	–	–	–	+	+	–	–	–	–	–	–	–	+	+	+	–	–	–	–	–
Радиальная и осевая теплопроводность в твэле и конструкциях	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Теплообмен тяжёлого жидкого металла в каналах простой формы	–	+	+	+	–	–	–	–	0	–	–	–	+	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Теплообмен при обтекании тяжёлым жидким металлом змеевиков	–	–	–	–	+	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–

Продолжение таблицы 6.14

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Теплообмен ТЖМ в пучках гладких твэлов, в том числе при наличии дистанционирующей решетки (треугольная упаковка)	–	–	–	–	–	–	–	–	–	+	–	+	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Теплообмен к пароводяной смеси в различных зонах прямоточного змеевикового ПГ, включая кризис теплоотдачи	–	–	–	–	+	–	+	–	0	–	+	–	–	+	+	+	+	+	–	–	–	–	–
Лучистый теплообмен со свободной поверхности ТЖМ	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Теплоотдача к воздуху в теплообменнике САОР	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	+	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Теплообмен в теплоизолирующем зазоре опускного участка ПГ	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	+	–	–	–	–	–	–	–	–	–

Продолжение таблицы 6.14

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
Изменения уровней теплоносителя в газовом объёме, УПОС и др. элементах	–	–	–	–	–	–	–	–	+	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	+
Истечение пароводяной смеси в поток ТЖМ	–	–	–	–	–	0	–	–	+	–	–	–	–	–	–	–	–	–	+	+	+	–	–	–
Движение паровых образований в потоке ТЖМ	–	–	–	–	–	–	–	–	+	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Импульс давления и его распространение по контуру РУ при образовании межконтурной течи парогенератора	–	–	–	–	–	+	–	–	+	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Теплообмен в присутствии пароводяной смеси в теплоносителе первого контура	–	–	–	–	–	+	–	–	+	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Естественная и вынужденная конвекция теплоносителя в больших полостях	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–

Таблица 6.15 – Фрагмент матрицы верификации в части представительных явлений и режимов проектируемых установок с реакторной установкой со свинцовым или свинцово-висмутовым теплоносителем и их воспроизведения на отдельных экспериментальных установках

Обозначения на пересечении строк и столбцов: «+» – воспроизведены «0» – ограничено воспроизведены «–» – не воспроизведены Экспериментальные стенды	Режимы нормальной эксплуатации	Режимы нарушения нормальной эксплуатации					
		Несанкционированное изменение реактивности	Нарушение теплоотвода от активной зоны	Изменение давления в газовой полости реакторного блока	Уменьшение отвода тепла вторым контуром	Избыточный отвод тепла вторым контуром	Нарушения при обращении с ядерным топливом
HELIOS (Сеульский нац. университет, Южная Корея)	+	–	–	–	–	–	–
TALL (Швеция), прямоточный теплообменник (круглая труба)	+	+	0	0	0	0	–
TALL (Швеция), имитатор твэла (кольцевой зазор)	+	+	0	0	0	0	–
TALL (Швеция), интегральный стенд	+	+	+	0	0	+	–
СПРУТ (АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», Россия)	0	0	0	–	0	0	–
LIFUS 5 (Италия)	–	–	–	0	–	–	–
Стенд АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» (Россия)	0	0	0	–	0	0	–
Стенд ВТИ (ОАО «НПО ЦКТИ», Россия)	0	0	0	–	0	0	–
Стенд ИТ СО РАН (Россия)	–	–	–	0	–	–	–
Стенд ЦКТИ (СССР), продольное обтекание пучков	0	0	0	–	0	0	–

Продолжение таблицы 6.15

Обозначения на пересечении строк и столбцов: «+» – воспроизведены «0» – ограничено воспроизведены «–» – не воспроизведены Экспериментальные стенды	Режимы нормальной эксплуатации	Режимы нарушения нормальной эксплуатации					
		Несанкционированное изменение реактивности	Нарушение теплоотвода от активной зоны	Изменение давления в газовой полости реакторного блока	Уменьшение отвода тепла вторым контуром	Избыточный отвод тепла вторым контуром	Нарушения при обращении с ядерным топливом
Стенд ЦКТИ (СССР), поперечное обтекание пучков	0	0	0	–	0	0	–
THEADES (Германия)	0	0	0	–	0	0	–
ЭУСТ (АО «НИКИЭТ», Россия)	0	0	0	–	0	0	–
БРЕСТ-3 (АО «НИКИЭТ», Россия)	0	0	0	–	0	0	–
Стенд МЭИ (НИУ «МЭИ», (Россия)	0	0	0	–	0	0	–
Стенд ЭВТУС АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» (Россия)	0	0	0	–	0	0	–
Королевский технологический институт Стокгольма (Швеция)	0	0	0	–	0	0	–
Установка для эксперимента Беннета	0	0	0	–	0	0	–
Стенд АО «ЭНИЦ»	–	–	–	0	–	–	–
Стенд ЦКТИ по критическому истечению	–	–	–	0	–	–	–
Стенд ВТИ по критическому истечению	–	–	–	0	–	–	–
Проливка сборки РУ БРЕСТ-ОД-300, стенд ЭУСТ	+	+	+	+	+	+	+
Эксперименты с уровнем, стенд АО «НИКИЭТ»	+	+	+	+	+	+	+

Таблица 6.16 – Фрагмент матрицы верификации, содержащий перечень аналитических тестов и представительные явления проектируемых установок с реакторной установкой со свинцовым или свинцово-висмутовым теплоносителем

1	2	3	4	5	6	7	8
Аналитический тест/Явления	Радиальная и осевая теплопроводность в твэле и конструкциях	Лучистый теплообмен со свободной поверхности ТЖМ	Гидравлическое сопротивление тяжёлого жидкого металла (ТЖМ) в обогреваемых и необогреваемых каналах простой формы (трубы, кольцевые каналы), в том числе при наличии слоя окислов	Гидравлическое сопротивление ТЖМ в обогреваемых и необогреваемых пучках (треугольная упаковка), в том числе при наличии дистанционирующей решётки	Теплообмен ТЖМ в каналах простой формы (трубы и кольцевые каналы), в том числе с учётом окислов	Движение паровых образований в потоке ТЖМ	Истечение паровой смеси в поток ТЖМ
Радиальная теплопроводность в полном цилиндре	+	–	–	–	–	–	–
Аксиальная теплопроводность	+	–	–	–	–	–	–
Излучение в системе трёх тел	–	+	–	–	–	–	–
Излучательный теплоперенос между коаксиальными цилиндрами	–	+	–	–	–	–	–
Излучательный теплообмен между верхней крышкой реактора и поверхностью свинцового теплоносителя	–	+	–	–	–	–	–
Стационарное течение свинцового теплоносителя в горизонтальной круглой трубе	–	–	+	–	–	–	–
Стационарное течение свинцового теплоносителя в вертикальной круглой трубе	–	–	+	–	–	–	–

Продолжение таблицы 6.16

1	2	3	4	5	6	7	8
Стационарное течение свинцового теплоносителя в кольцевом зазоре в горизонтальном канале	–	–	+	–	–	–	–
Стационарное течение свинцового теплоносителя в кольцевом зазоре в вертикальном канале	–	–	+	–	–	–	–
Продольное обтекание свинцовым теплоносителем ТВС с гексагональной упаковкой стержней	–	–	–	+	–	–	–
Продольное обтекание свинцовым теплоносителем ТВС с квадратной упаковкой стержней	–	–	–	+	–	–	–
Продольное обтекание свинцовым теплоносителем гексагонального пучка оребренных стержней с навивкой «ребро по ребру»	–	–	–	+	–	–	–
Теплопередача стенка – свинцовый теплоноситель при термически стабилизированном течении в горизонтальной круглой трубе	–	–	–	–	+	–	–
Теплопередача стенка – свинцовый теплоноситель при термически и гидродинамически стабилизированном турбулентном течении в кольцевом зазоре в горизонтальном канале с односторонним обогревом снаружи	–	–	–	–	+	–	–

Продолжение таблицы 6.16

1	2	3	4	5	6	7	8
Теплопередача стенка – свинец при термически и гидродинамически стабилизированном турбулентном течении в кольцевом зазоре в горизонтальном канале с односторонним обогревом изнутри	–	–	–	–	+	–	–
Теплопередача стенка – свинец при термически и гидродинамически стабилизированном турбулентном течении в кольцевом зазоре в горизонтальном канале с двусторонним обогревом	–	–	–	–	+	–	–
Движение парового пузыря в открытой трубе	–	–	–	–	–	+	+
Движение парового пузыря в заглушенной трубе	–	–	–	–	–	+	+
Перенос пузырька по замкнутому контуру	–	–	–	–	–	+	+
Всплытие пузырька в трубе с газовой подушкой	–	–	–	–	–	+	+
Впрыск свинца в свинец с газовой подушкой	–	–	–	–	–	+	+
Подъём и опускание уровня в трубе с газом	–	–	–	–	–	+	+
Подъём и опускание уровня в трубе с газом с постоянной скоростью в открытой трубе	–	–	–	–	–	+	+
Перенос пароводяной смеси в модели контура РУ БРЕСТ	–	–	–	–	–	+	+

Нейтронно-физический модуль

Верификация нейтронно-физического модуля для РУ с быстрым спектром проводилась одновременно для всех типов жидкометаллического теплоносителя. Дополнительно в матрицу верификации были включены кросс-верификационные расчёты стационарных состояний РУ БРЕСТ-ОД-300 на разрешённых уровнях мощности с аттестованным нейтронно-физическим кодом MCU-BR [273], базирующемся на методе Монте-Карло, и результаты нейтронно-физических измерений на критических сборках БФС-113-А и БФС-113-В (таблица 6.17).

Таблица 6.17 – Матрица верификации нейтронно-физического модуля применительно к РУ БРЕСТ-ОД-300

Параметр	Условия эксплуатации (режимы)	
	Стационарное состояние на энергетическом уровне мощности	
	Прецизионные расчёты по коду MCU-BR. Модель РУ БРЕСТ-ОД-300	Результаты нейтронно-физических измерений на критических сборках БФС-113-А и БФС-113-В
Эффективный коэффициент размножения	+	+
Эффективность органов СУЗ	+	+
Эффективная доля запаздывающих нейтронов	+	–
Мощность энерговыделения ТВС в активной зоне	+	–
Пустотный эффект реактивности по свинцу	–	+

Твэльный модуль

Матрица верификации твэльного модуля интегрального программного комплекса ЕВКЛИД/V1 применительно к РУ с тяжёлым жидкометаллическим теплоносителем аналогична матрице верификации для РУ с натриевым теплоносителем и отличается только отсутствием экспериментов по облучению твэлов с оксидным топливом в РУ БН-600.

Модуль расчёта выгорания

Матрица верификации модуля расчёта выгорания аналогична матрице, представленной выше для реакторных установок с натриевым теплоносителем.

Модуль расчёта остаточного энерговыделения

Матрица верификации модуля расчёта остаточного энерговыделения аналогична матрице, представленной выше для РУ с натриевым теплоносителем.

Матрица верификации интегрального программного комплекса ЕВКЛИД/V1

Для оценки величины погрешности расчёта интегральным комплексом ЕВКЛИД/V1 отдельных параметров предложено представить погрешность в виде суммы двух составляющих: методической составляющей (погрешность используемых численных схем и моделей) и эмпирической составляющей (погрешность используемых замыкающих соотношений, корреляций, ядерно-физических данных). Для оценки методической и эмпирической составляющих погрешности, а также для обоснования корректности используемых систем уравнений применительно к действующим и проектируемым реакторным установкам с натриевым теплоносителем может использоваться база верификационных данных, накопленная при проектировании и эксплуатации уже существующих и функционирующих реакторных установок с натриевым теплоносителем. Ключевую роль при этом играют данные интегральных экспериментов, полученные при эксплуатации РУ.

При недостатке или отсутствии экспериментальных данных особое место занимают реперные расчёты с использованием аттестованных кодов. Для кросс-верификации с аттестованным кодом BURAN [10] в матрицу верификации включены интегральные расчёты РУ БН-1200.

Полный список экспериментов и кросс-верификационных расчётов, включённых в матрицу верификации, представлен в таблице 6.18.

Таблица 6.18 – Список интегральных тестов для верификации программного комплекса ЕВКЛИД/V1

Название режима	Тип РУ	Тип используемых данных	№
Срабатывание БАЗ при мощности реактора ~35 % $N_{\text{ном}}$	БН-600	Экспериментальные данные	Э1
Срабатывание БАЗ после отключения петли и незакрытия обратного клапана ГЦН-1 этой петли при мощности реактора ~12 % $N_{\text{ном}}$	БН-600	Экспериментальные данные	Э2
Падение АЗ-П при мощности реактора 100 % $N_{\text{ном}}$	БН-600	Экспериментальные данные	Э3
Отключение теплоотводящей петли при работе реактора на уровне мощности ~ 100 % $N_{\text{ном}}$	БН-600	Экспериментальные данные	Э4
Останов энергоблока в результате срабатывания БАЗ по факту отключения двух из трёх ТГ при мощности реактора ~ 95 % $N_{\text{ном}}$	БН-600	Экспериментальные данные	Э5
Отключение одной из трёх работающих петель при работе реактора на уровне мощности ~ 100 % $N_{\text{ном}}$	БН-800	Экспериментальные данные	Э6
Непредусмотренное перемещение стержня РС из активной зоны реактора	БН-1200	Кросс-верификация с кодом BURAN	К1
Непредусмотренное перемещение стержня КС из активной зоны реактора	БН-1200	Кросс-верификация с кодом BURAN	К2
Потеря системного электроснабжения реактора	БН-1200	Кросс-верификация с кодом BURAN	К3

Согласно РД-03-34-2000 [160] матрица верификации должна включать перечень режимов РУ, подлежащие проверке физические явления, протекающие при моделировании

6.3 Основные результаты верификации

В результате верификации интегрального программного комплекса ЕВКЛИД/V1 были промоделированы аналитические или численные задачи и эксперименты, в которых исследовались все основные процессы и явления, перечисленные в пункте 1.5 данной диссертационной работы, за исключением истечения пароводяной смеси в поток ТЖМ, естественной и вынужденной конвекции тяжёлого жидкометаллического теплоносителя в больших полостях, изменения геометрии тракта течения теплоносителя за счёт процессов коррозии и отложения, а также формоизменения твэлов, экспериментальные исследования для изучения которых в настоящее время отсутствуют.

Результаты верификационных расчётов, выполненных по изложенной в разделе 5 методике, опубликованы в верификационных отчётах [28, 41, 42], содержащих более 2500 страниц текста. В диссертационной работе в таблицах 6.20–6.22 результаты верификации представлены в обобщённом виде: количество использованных для верификации экспериментальных точек/динамических экспериментов, значения погрешностей расчёта отдельных параметров, которые измерялись в экспериментах [26]. В столбце «Диапазон изменения» указаны значения параметров, соответствующие их максимальным и минимальным значениям по всем экспериментам.

Результаты моделирования теплогидравлических экспериментов приведены в таблице 6.20, экспериментов по испытаниям твэлов с оксидным и нитридным топливом в реакторах на быстрых нейтронах – в таблице 6.21. Оценки погрешностей расчёта температуры топлива и оболочки и термомеханических параметров твэлов получены путём сравнения результатов расчётов кодом ЕВКЛИД/V1 с аналитическими решениями и результатами расчётов по прецизионному конечно-элементному программному комплексу MSC.MARC. Так, отклонение расчётной температуры от «реперных» значений в стационарных и динамических режимах не превышает 1 К, напряжений в топливе и оболочке – 2 %, деформаций – 5 %. В таблице 6.22 приведены погрешности расчёта основных нейтронно-физических параметров.

Таблица 6.20 – Погрешности расчёта кодом ЕВКЛИД/V1 теплогидравлических параметров

Параметр	Экспериментальные стенды	Количество экспериментальных точек/динамических экспериментов	Диапазон изменения	Погрешность расчёта
Реакторные установки с натриевым теплоносителем				
Абсолютное давление в I контуре в стационарных, переходных и аварийных режимах: без кипения теплоносителя; с кипением теплоносителя	6 Б, стенд ИВТ РАН, ML-4	179/–	0,1–2,1 МПа	±15 % ±20 %
Абсолютное давление во II контуре в стационарных, переходных и аварийных режимах	6 Б, стенд ИВТ РАН, ML-4	101/–	0,5–2,1 МПа	±15 %
Температура теплоносителя в I и II контурах в стационарных, переходных и аварийных режимах	Стенд ЦКТИ, SIENA, KNS, FFM, БОР-60, БН-600, БН-800	8 / 10	465–1230 К	±19 К
Расход натрия при естественной циркуляции	БН-600	–/2	5–150 кг/с	±27 %

Продолжение таблицы 6.20

Параметр	Экспериментальные стенды	Количество экспериментальных точек/динамических экспериментов	Диапазон изменения	Погрешность расчёта
Максимальная температура оболочки твэлов при докризисном режиме охлаждения	Стенд ЦКТИ, СПРУТ, стенд ИВТ РАН, KNS, THORS	239/9	490–1300 К	± 15 К
Максимальная температура трубок парогенератора	СПРУТ	199/–	520–700 К	± 7 К
Максимальная температура оболочки твэлов при закризисном режиме охлаждения	THORS	–/3	1200–1315 К	± 37 К
Истинное объёмное паросодержание (натриевый теплоноситель)	SIENA	–/1	0–1,0	$\pm 0,05$
Концентрация растворенного водорода в натрия	БН-600	3/–	0–0,3 ppm	± 17 %
Температура воздуха на выходе из воздушного теплообменника	JOYO, БОР-60	6/1	299–594 К	± 5 К

Продолжение таблицы 6.20

Параметр	Экспериментальные стенды	Количество экспериментальных точек/динамических экспериментов	Диапазон изменения	Погрешность расчёта
Реакторные установки со свинцовым или свинцово-висмутовым теплоносителем				
Абсолютное давление в I контуре за исключением аварийного модуля парогенератора в режиме, вызванном исходным событием «разрыв трубок парогенератора»	TALL, HELIOS	35/–	0,1– 1,0 МПа	±10 %
Абсолютное давление в пределах аварийного модуля парогенератора в режиме, вызванным исходным событием «разрыв трубок парогенератора»	LIFUS 5	–/1	0,1– 3,6 МПа	±33 %
Температура теплоносителя в I контуре: свинца свинца-висмута	СПРУТ, TALL	179/5	605–818 К (свинец) 420–733 К (свинец-висмут)	±14 К* ±9 К

Продолжение таблицы 6.20

Параметр	Эксперимен- тальные стенды	Количество эксперимен- тальных точек/дина- мических экспе- риментов	Диапазон изменения	Погреш- ность расчёта
Максимальная температура (для свинцово-висмутового теплоносителя): оболочек ТВЭЛОВ трубок парогенератора	Стенд ЦКТИ	1298/–	490–513 К 481–533 К	±5 К ±30 К
Расход теплоносителя в I контуре в режиме естественной циркуляции	TALL	–/1	0– 130 кг/(м ² ·с)	±6 %
Температура воздуха на выходе из теплообменника системы аварийного охлаждения реактора (CAOP)	Стенд АО «НИКИЭТ»	565/–	310–664 К	±31 К
* Значение, полученное с учётом указанной погрешности, не должно быть меньше температуры плавления.				

Таблица 6.21 – Погрешности расчёта кодом ЕВКЛИД/V1 параметров ТВЭЛА

Параметр	Реактор	Число исследованных ТВЭЛОВ	Диапазон изменения выгорания, % т.а.	Погреш- ность расчёта, %
Выход ГПД UO_2 топливо, н.у. см^3	БН-600	2	Менее 11,6	+74
Выход ГПД МОКС топливо, н.у. см^3	БН-600	2	Менее 11,8	± 2
Выход ГПД СНУП топливо, моль	БОР-60, БН-600	1 16	Менее 5,5	+45
Максимальное изменение наружного диаметра ТВЭЛА с МОКС топливом, %	БН-600	2	Менее 11,8	± 22
Максимальное изменение наружного диаметра ТВЭЛА со СНУП топливом, %	БН-600	16	Менее 5,5	± 8
Внутреннее давление в ТВЭЛЕ со СНУП топливом, МПа	БН-600	16	Менее 5,5	± 53

Таблица 6.22 – Погрешность расчёта основных нейтронно-физических характеристик

Параметр	Реактор	Число экспериментальных точек	Погрешность
Изменение нейтронной мощности реактора в динамических режимах	БН-600	5	$\pm 4 \%$
Глубина выгорания топлива	БН-350, БН- 600	3	$\pm 5 \%$
Мощность остаточного энерговыведения	БН-600, LANL, ORNL	31	$\pm 15 \%$

Следует отметить, что практическое применение методики оценки погрешностей результатов расчётов на основе анализа неопределённостей осуществлено для всех задач из матрицы верификации впервые. Оценены погрешности расчёта теплогидравлических и нейтронно-физических параметров, важных при обосновании безопасности объектов использования атомной энергии.

6.4 Необходимость получения дополнительных экспериментальных данных

Исходя из изложенного выше, видно, что для верификации и проверки моделей интегральных кодов применительно к РУ с натриевым теплоносителем данных, в основном, достаточно, что связано с наличием действующего исследовательского реактора (БОР-60) и энергетических реакторов на Белоярской АЭС (БН-600, БН-800). С точки зрения экспериментов по отдельным явлениям, следует признать, что было бы целесообразным выполнение экспериментов по изучению кризиса теплоотдачи, процессов взрывного вскипания натрия, теплообмена на участках с нестабилизированным кипением, а также по измерению детальных характеристик потока, в частности, по определению объёмной доли фаз, их скоростей и температур. Кроме того, отдельное внимание заслуживает вопрос о необходимости создания структурно подобного объекту использования атомной энергии интегрального стенда для изучения двухфазных процессов, протекающих в натриевом теплоносителе.

Для тяжёлого жидкометаллического теплоносителя данных, которые можно использовать для верификации теплогидравлического модуля, существенно меньше. В частности, практически отсутствуют эксперименты по изучению естественной и вынужденной конвекции теплоносителя в больших полостях, процессов, протекающих при разрыве трубок парогенератора, процесса замерзания свинца при попадании в него воды, изучению протекания взаимосвязанных теплогидравлических процессов на интегральных стендах, структурно подобных объекту использования атомной энергии. При этом необходимо отметить, что основное отличие жидких металлов от воды заключается в высокой теплопроводности жидкой фазы и, как следствие, малости числа Прандтля. Таким образом, различия в поведении жидких металлов и воды должны проявляться при наличии явлений, сопровождающихся передачей тепла. Следовательно, в части верификации моделей гидродинамических процессов в жидком металле можно воспользоваться результатами измерений, выполненных на воде. Что касается изучения процессов замерзания теплоносителя, протекающих при разрыве трубок парогенератора, то частично существующие пробелы должны быть заполнены в результате экспериментальных исследований, проведение которых планируется в проектном направлении

«Прорыв» в ближайшие несколько лет. Кроме того, в настоящее время с участием автора диссертационной работы прорабатывается обоснование интегрального стенда для изучения взаимосвязанных теплогидравлических процессов и явлений.

Для верификации твэльного модуля необходимо выполнение экспериментов по облучению твэлов с оксидным и нитридным топливом в широком диапазоне значений выгорания с приведением данных об исходном состоянии топлива: точных размеров топливных сердечников и оболочек твэлов, средних размеров топливных зерен и технологических пор и других. Кроме того, для верификации механистических моделей твэльного модуля необходимо провести исследования кинетики выхода продуктов деления из топлива в процессе облучения и распухания в зависимости от температуры и выгорания. Данные для верификации твэльного модуля должны быть получены в результате реализации комплексной программы расчётно-экспериментальных исследований по исследованию поведения твэлов со СНУП топливом, реализуемой в рамках проектного направления «Прорыв».

Существует недостаточное количество экспериментальных данных по исследованию состава топлива (как оксидного, так и нитридного) отработавшего в реакторах на быстрых нейтронах, включая накопление актиноидов и продуктов деления. Фактически, на данный момент для верификации можно использовать только результаты комплекса исследований состава отработавшего оксидного топлива, полученные на БН-350, и нитридного топлива, облученного в составе КЭТВС-1 в РУ БН-600, где в качестве основных результатов получены уникальные данные по значениям выгорания, массовых содержаний актинидов в топливе, массового накопления некоторых продуктов деления, изотопного состава ряда элементов. Продолжение исследований для широкого круга образцов нитридного топлива запланировано в проектном направлении «Прорыв».

Кратко потребность в дополнительных экспериментальных данных, необходимых для верификации интегрального программного комплекса применительно к действующим и проектируемым реакторным установкам с натриевым теплоносителем и проектируемым реакторным установкам с тяжёлым жидкометаллическим теплоносителем, приведена в виде таблицы 6.23.

Таблица 6.23 – Перечень дополнительных экспериментальных данных, необходимых для верификации интегрального программного комплекса

№	Наименование	Измеряемые параметры
Теплогидравлические стенды		
1.	Изучение теплоотдачи в парогенераторе РУ (для конкретного объекта использования атомной энергии)	Температура теплоносителя по высоте, температура рабочего тела по высоте, температура стенки трубок ПГ
2.	Изучение теплоотдачи в ТВС (для конкретного объекта использования атомной энергии)	Температура теплоносителя по высоте, температура поверхности имитаторов твэлов
3.	Изучение процесса теплоотдачи «тяжёлый жидкометаллический теплоноситель–пароводяная смесь»	Температура тяжёлого жидкометаллического теплоносителя, скорость подъёма пузырька, размер пузырька
4.	Изучение спектра размеров пароводяных образований, возникающих при разрыве трубок парогенератора с тяжёлым жидкометаллическим теплоносителем	Спектр размеров пароводяных образований, динамика их изменения
5.	Изучение процесса распространения пароводяной смеси в тяжёлом жидкометаллическом теплоносителе	Температура теплоносителя по тракту циркуляции теплоносителя, давление по тракту циркуляции теплоносителя, уровень теплоносителя
6.	Изучение режима естественной циркуляции тяжёлого жидкометаллического теплоносителя на интегральном стенде, структурно подобном объекту использования атомной энергии	Расход в режиме ЕЦ, температуры теплоносителя и имитаторов твэлов

Продолжение таблицы 6.23

№	Наименование	Измеряемые параметры
7.	Изучение процессов теплообмена в замкнутом контуре. Перенос свинца по замкнутому контуру с источниками и стоками тепла – имитаторами а.з. и ПГ с сохранением удельного расхода свинца ($\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$), относительных пропорций по геометрии элементов контура (длина контура, сечения каналов, площадь тепловых структур) и диапазона характерных безразмерных параметров течения	Измерение скорости и температуры в различных сечениях контура, включая, по возможности, поперечные распределения, измерение температуры стенок, имитаторов твэлов и трубок ПГ, измерение скорости и температуры ТЖМТ в узких каналах и на участках изгибов
8.	Изучение процессов затвердевания/плавления тяжёлого жидкометаллического теплоносителя	Расход тяжёлого жидкометаллического теплоносителя, а также температуры на входе и выходе из экспериментального участка, измерения температур стенок трубок (внешней и внутренней поверхности) в нескольких точках по продольной координате для получения сведений о перемещении фронта затвердевания в ходе эксперимента
9.	Изучение отдельных режимов нарушений нормальной эксплуатации с кипением теплоносителя на интегральном стенде	Измерение скорости и температуры в различных сечениях контура, измерение паросодержания
Параметры твэла		
10.	Облучение экспериментальных ТВС с твэлами со СНУП и оксидным топливом в БН-600, БН-800 и БОР-60	Подробный перечень параметров сформулирован в типовой программе послереакторных исследований твэлов со смешанным нитридным уран-плутониевым топливом после облучения в реакторе БН-600, разработанной в проектно-направлении «Прорыв»

Продолжение таблицы 6.23

№	Наименование	Измеряемые параметры
11.	Ампульные эксперименты	В ходе экспериментов должны измеряться температура топлива и внутренней конструкции капсулы, активность основных ГПД, вышедших из топливных образцов «продуваемых» ампул. Должен быть выполнен полный цикл до- и послереакторных исследований.
Нейтронно-физические характеристики		
12.	Эксперименты по определению концентраций нуклидов из актинидов и продуктов деления при выгорании	Измерение концентраций нуклидов гамма-сканированием

6.5 Заключительные и обобщающие замечания по разделу 6

В разделе 6 представлены разработанные матрицы верификации для отдельных модулей интегрального программного комплекса ЕВКЛИД/V1 и всего программного комплекса в целом, а также результаты выполненной верификации:

1. В матрицу верификации теплогидравлического модуля для действующих и проектируемых реакторных установок с натриевым теплоносителем включено 24 аналитических теста, опытные данные, полученные на 13 экспериментальных стендах и 2 реакторных установках – БОР-60 и БН-600. Экспериментальные данные позволили провести верификацию теплогидравлического модуля интегрального программного комплекса ЕВКЛИД/V1 и оценить погрешности расчёта таких параметров, как давление в контурах реакторной установки, температура натриевого теплоносителя, температура оболочки твэлов и воздуха на выходе из воздушного теплообменника, температура пароводяной смеси в пределах парогенератора, расход теплоносителя при естественной циркуляции, паросодержание.

2. В матрицу верификации нейтронно-физического модуля, включая модули расчёта выгорания и остаточного энерговыделения, отобраны данные экспериментов по нейтронно-физическим измерениям на критических сборках БФС (АО «ГНЦ РФ–ФЭИ»), расчётные и экспериментальные результаты бенчмарков, включая международные, а также данные

экспериментов по определению остаточного энерговыделения, выполненные в Лос-Аламосской национальной лаборатории (LANL, США), Окриджской национальной лаборатории (ORNL, США) и на сборках, облучённых в РУ БН-600. Для верификации модуля расчёта выгорания топлива в матрицу включены результаты экспериментальных измерений, выполненных с топливом, облучённым в РУ БН-600 и БН-350.

3. Для верификации твэльного модуля были поставлены аналитические задачи (упругий цилиндр под давлением, упругий цилиндр в неоднородном поле температур и др.), расчётные задачи для кросс-верификации с коммерческим трёхмерным конечно-элементным программным комплексом MSC.MARC и результаты послерадиационных исследований твэлов с оксидным и нитридным топливом, облученных в реакторных установках БН-600 и БОР-60. Экспериментальные данные позволили провести верификацию и оценить погрешности расчёта таких характеристик твэла, как выход газообразных продуктов деления, размеры топливных таблеток и оболочки в ограниченном диапазоне значений выгорания.

4. Для реакторных установок с тяжёлым жидкометаллическим теплоносителем имеется ограниченный набор экспериментальных данных для теплогидравлических характеристик. По результатам их моделирования была оценена адекватность расчёта давления в контурах реакторной установки, температуры тяжёлого жидкометаллического теплоносителя, температуры оболочек твэлов и трубок парогенератора, расхода тяжёлого жидкометаллического теплоносителя при естественной циркуляции, температуры воздуха на выходе из системы аварийного охлаждения реактора в исследованных диапазонах режимных параметров.

5. Результаты экспериментальных режимов реакторных установок БОР-60, БН-600 и БН-800 позволили оценить корректность расчётов по коду ЕВКЛИД/V1 взаимосвязанных теплогидравлических и нейтронно-физических процессов. Использование одних и тех же базовых математических моделей и приближений, а также связей между ними, позволяет предположить применимость расчетного кода ЕВКЛИД/V1 для всех РУ на быстрых нейтронах с ЖМТ, рассматриваемых в диссертационной работе.

6. Сформулирован перечень дополнительных экспериментальных исследований, которые необходимо выполнить для верификации интегральных программных комплексов. При этом следует отметить, что большая часть недостающих экспериментальных данных должна быть получена в течение ближайших нескольких лет в проектном направлении «Прорыв».

7 Анализ отдельных режимов нормальной эксплуатации и нарушений нормальной эксплуатации РУ на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем

7.1 Вводные замечания к разделу 7

Конечной целью создания программного обеспечения является решение с его помощью актуальных прикладных задач. В связи с тем что объём диссертации не позволяет привести все полученные по программному комплексу ЕВКЛИД/V1 результаты моделирования режимов РУ БН-1200 и БРЕСТ-ОД-300, в том числе, в составе интегральной расчётной математической модели опытно-демонстрационного энергокомплекса с РУ БРЕСТ-ОД-300, для представления в диссертационной работе были выбраны три режима РУ БРЕСТ-ОД-300 и два режима РУ БН-1200, важные для обоснования безопасности соответствующих реакторных установок и позволяющие продемонстрировать ключевые возможности интегрального программного комплекса ЕВКЛИД/V1. Для каждой реакторной установки приведены результаты расчёта стационарного режима работы на номинальном уровне мощности, включая квалификацию нодализационной схемы и сравнение с проектными данными, поскольку от качества исходных данных и результатов расчёта стационарного режима зависит адекватность моделирования переходных процессов, для которых стационарное состояние является начальным. Для РУ БРЕСТ-ОД-300 приведены также результаты моделирования режима с вводом полного запаса положительной реактивности, позволяющего продемонстрировать необходимость решения задачи в связанной постановке с использованием всех модулей (кроме выгорания топлива и остаточного энерговыделения) интегрального программного комплекса, а также результаты моделирования режима, вызванного исходным событием «гильотинный разрыв трубки парогенератора», поскольку интегральный программный комплекс ЕВКЛИД/V1 – первый отечественный расчётный код, позволяющий решить данную задачу. Для РУ БН-1200 приведены результаты моделирования начальной стадии аварии с потерей электроснабжения и отказом средств воздействия на реактивность, демонстрирующие возможности программного комплекса по моделированию процессов кипения натрия с учётом пространственных нейтронно-физических эффектов. Представленные результаты получены под непосредственным руководством и с участием автора диссертационной работы. Неопределённости моделирования отдельных параметров реакторных установок определены на основе методики, описанной в разделе 5 диссертационной работы.

Приведённые в данном разделе результаты опубликованы частично в верификационном отчёте [28], в статье и материалах конференций [274–279].

Рисунок 7.1 – Расчётная модель первого контура РУ БРЕСТ-ОД-300

Модель РУ БРЕСТ-ОД-300 включает в себя следующие основные элементы:

- а.з., центральную и периферийные полости реактора;
- ПГ (по второму контуру – граничные условия по расходу питательной воды и температуре на входе в ПГ и давлению на выходе из ПГ);
- ГЦНА;
- теплообменники САОР.

Теплогидравлический тракт представлен четырьмя петлями циркуляции теплоносителя по количеству ГЦНА. В каждой петле смоделированы независимые участки подачи СТ от а.з. к каждому модулю парогенератора и проходки возврата теплоносителя в опускную часть центральной полости реакторного блока.

Центральная часть а.з. состоит из 109 шестигранных ячеек, периферийная часть а.з. состоит из 60 шестигранных ячеек ТВС ПЗ. Картограмма а.з. приведена на рисунке 7.2 и соответствует теплогидравлической и нейтронно-физической расчётным моделям, используемым при моделировании интегральным программным комплексом ЕВКЛИД/V1.

При дискретизации а.з. РУ БРЕСТ-ОД-300 по высоте выделены следующие основные зоны: нижние и верхние опорные конструкции а.з., области верхних и нижних компенсационных объёмов твэлов, активная часть твэлов, содержащая топливо (смотреть рисунок 7.3). Аксиальная сетка равномерная и состоит из 27 слоёв высотой 10 см каждый.

В каждом теплогидравлическом канале а.з., кроме каналов УПОС и бокового свинцового отражателя, заведены объекты FuelRod с подробным описанием конструкции и материалов твэлов РУ БРЕСТ-ОД-300. Материалы топлива и оболочек твэлов в обеих подзонах (ЦЗ и ПЗ) одинаковые – топливо (UPu)N и сталь ЭП-823 соответственно. Газовый подслоя – гелий. Размеры твэлов ТВС ЦЗ и ПЗ разные. Наружный диаметр твэла в ЦЗ – 9,7 мм, диаметр топливной таблетки – 8,5 мм (рисунок 7.4), в ПЗ диаметр твэлов больше и составляет 10,5 мм, диаметр топливной таблетки – 9,3 мм.

В осевом направлении активная часть твэлов равномерно разбивалась на 11 ячеек высотой 10 см. Каждая осевая ячейка состояла из топливной таблетки, газового зазора и оболочки. В осевых ячейках вводилась одномерная неравномерная пространственная сетка, построенная таким образом, чтобы узлы располагались на наружной границе твэла и на границах между материалами, составляющими твэл. В каждом отдельном материале сетка по радиальной координате равномерная.

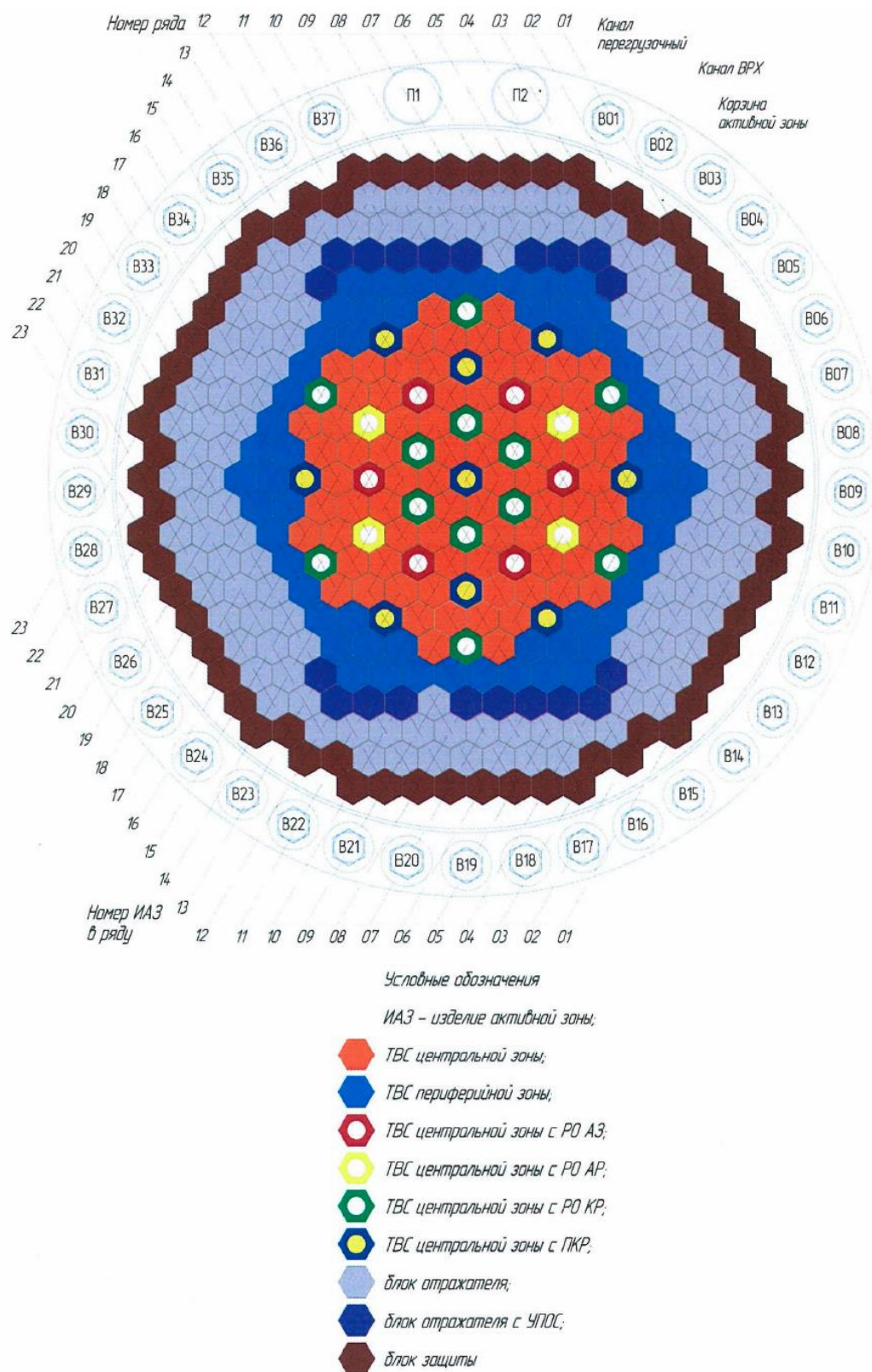


Рисунок 7.2 – Картограмма а.з. РУ БРЕСТ-ОД-300

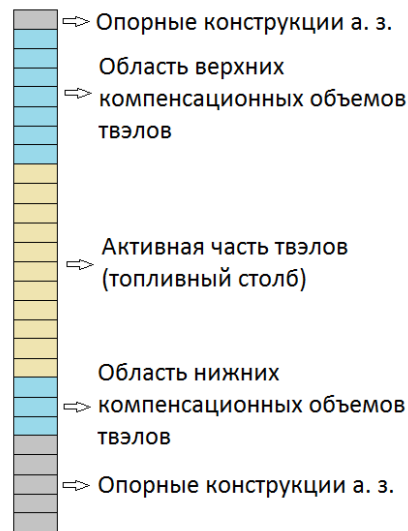


Рисунок 7.3 – Разбиение а.з. РУ БРЕСТ-ОД-300 по высоте

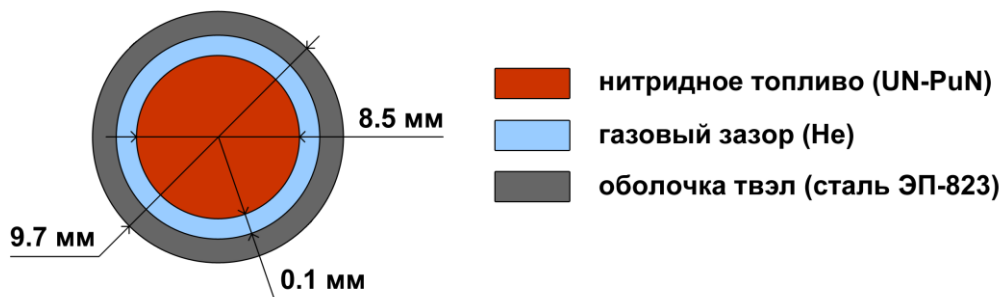


Рисунок 7.4 – Геометрия твэла ТВС ЦЗ

Квалификация теплогидравлической нодализационной схемы

Процесс квалификации системных теплогидравлических кодов обычно состоит из трёх этапов [281]:

- проверка точности воспроизведения геометрии моделируемой РУ;
- квалификация стационарного режима работы РУ (осуществляется на основе экспериментальных данных);
- квалификация переходного режима (осуществляется на основе экспериментальных данных).

Ниже будет рассмотрена квалификация только первого и второго шагов на основе проектных данных, поскольку экспериментальные данные по стационарному и переходным режимам РУ БРЕСТ-ОД-300 в настоящее время отсутствуют.

Проверка точности воспроизведения геометрии РУ БРЕСТ-ОД-300

Целью проверки точности воспроизведения геометрии РУ является демонстрация того, что имеющиеся отличия между моделью и реальным объектом находятся ниже допустимого уровня. Список параметров, выбранных для рассмотрения, представлен в таблице 7.1 ниже. Е (в %) в таблице – это отклонение, определяемое по следующей формуле:

$$E = 100\% \cdot \frac{|Y_e - Y_c|}{Y_e}, \quad (7.1)$$

где Y_e – значение, соответствующее объекту (в соответствии с проектными данными), Y_c – значение, соответствующее разработанной модели.

Из таблицы 7.1 видно, что, в целом, расчётная модель достаточно точно описывает геометрию моделируемого объекта.

Таблица 7.1 – Сравнение проектных и расчётных характеристик РУ БРЕСТ-ОД-300 по геометрии

№	Параметр	Е, %	Комментарий
1	Объём свинца в центральной полости РУ	<1	—
2	Объём свинца в периферийной полости РУ	<1	
3	Общий объём свинца	<1	
4	Соединительная проходка от ПЗ к ЦЗ	<1	
5	Объём свинца в зазоре между корзиной а.з. и корпусом	<1	
6	Коллектор подачи СТ	<1	
7	Объём свинца в наружной полости ПГ	<1	
8	Объём теплоносителя в трассе САОР	<1	
Проходные сечения			
9	Проходное сечение в зазоре между корзиной а.з. и корпусом минимальное максимальное	<1 <1	Проходное сечение в зазоре между корзиной а.з. и корпусом минимальное максимальное
10	Проходное сечение верхней части центральной полости минимальное максимальное	<1 <1	Проходное сечение верхней части центральной полости минимальное максимальное

Продолжение таблицы 7.1

№	Параметр	Е, %	Комментарий
11	Проходное сечение в коллекторе подачи СТ минимальное максимальное	0 0	Проходное сечение в коллекторе подачи СТ минимальное максимальное
12	Проходное сечение в наружной полости ПГ минимальное максимальное	1 1	Проходное сечение в наружной полости ПГ минимальное максимальное
13	Проходное сечение во внутренней полости ПГ минимальное максимальное	<1 <1	Проходное сечение во внутренней полости ПГ минимальное максимальное
14	Проходное сечение участка течения ГЦН минимальное максимальное	0 19	Проходное сечение участка течения ГЦН минимальное максимальное
15	Проходное сечение течения СТ в САОР минимальное максимальное	0 0	Проходное сечение течения СТ в САОР минимальное максимальное
Диаметры			
16	Диаметр твэл ЦЗ	0	Диаметр твэл ЦЗ
17	Диаметр твэл ПЗ	0	Диаметр твэл ПЗ
18	Диаметр трубки ПГ	0	Диаметр трубки ПГ

Квалификация стационарного режима работы РУ БРЕСТ-ОД-300

Целью квалификации стационарного режима работы РУ является подтверждение того, что разработанная расчётная модель способна воспроизводить параметры работы рассматриваемого объекта в стационарном номинальном режиме работы. С этой целью, при помощи программного комплекса и разработанной расчётной модели выполняется моделирование стационарного режима работы, при этом критерием установления стационара

принято условие, при котором все основные параметры РУ меняются не более чем на 1 % за 500 с физического времени процесса. В таблице 7.2 представлены значения основных параметров РУ БРЕСТ-ОД-300 в стационарном режиме работы, полученные по коду ЕВКЛИД/V1, в сравнении с проектными данными. Отклонения от проектных данных по температуре теплоносителя не превышают 2 °С, по суммарному расходу – 1 %.

Таблица 7.2 – Сравнение проектных и расчётных характеристик РУ БРЕСТ-ОД-300 в номинальном стационарном режиме работы

Параметр	Проектное значение [282]	ЕВКЛИД/V1
Тепловая мощность, МВт	700	700
Расход питательной воды (на один ПГ), кг/с	50,8	50,8
Суммарный расход теплоносителя через ГЦНА, т/с	45,2	45,2
– Через фильтры	3,5	3,6
– Через теплообменники САОР	6,8	6,8
– Опускной участок	34,9	34,8
Расход через корзину а.з., т/с	41,7	41,6
Расход свинца через ПГ (трубный пучок), т/с	39,6	39,9
Температура свинца на выходе из ПГ, °С	415	414 ^{*)}
Температура свинца на выходе из теплообменников САОР, °С	419	417
Температура свинца на входе в активную зону, °С	420	418 ^{*)}
Температура свинца на выходе из активной зоны, °С	535	533
Температура питательной воды на входе в ПГ, °С	340	340

Продолжение таблицы 7.2

Температура пара на выходе из ПГ, °С	505	505
Средняя температура топлива в номинальном режиме работы, °С	–	836
Максимальная температура топлива в номинальном режиме работы, °С	–	1071
Максимальная температура оболочки твэл, °С	–	621
*) различия в температурах СТ на выходе ПГ и входе в а.з. обусловлены тем, что в камере под всасывающим коллектором ГЦНА происходит смешение потоков СТ из модулей ПГ, из которых поступает относительно холодный свинец, и байпасов ПГ, из которых поступает более горячий свинец.		

Стационарный режим работы на номинальном уровне мощности

Исключение вычислительных неопределённостей

Проведено исследование сходимости результатов расчёта стационарных параметров РУ БРЕСТ-ОД-300 по аксиальной сетке в а.з. За базовый вариант расчёта принято разбиение активной части на 11 слоёв толщиной 10 см каждый. Проведены расчёты с более детальными аксиальными сетками, в которых активная часть разбивалась на 22 слоя по 5 см и 44 слоя по 2,5 см. Полученные результаты приведены в таблице 7.3. Из представленных данных видно, что сгущение базовой аксиальной сетки не приводит к заметному изменению результатов расчёта.

Таблица 7.3 – Сравнение расчётных характеристик РУ БРЕСТ-ОД-300 в номинальном режиме работы для разных аксиальных сеток в а.з.

Параметр	dz=0,1 м	dz=0,05 м	dz=0,025 м
Суммарный расход СТ через ГЦНА, т/с	45,2	45,2	45,2
– Через фильтры	3,6	3,6	3,6
– Через теплообменники САОР	6,8	6,8	6,8
– Опускной участок	34,8	34,8	34,8
Расход СТ через корзину а.з., т/с	41,6	41,6	41,6
Расход СТ через ПГ (трубный пучок), кг/с	39,9	39,9	39,9
Температура СТ на выходе из ПГ, °С	414	414	414

Продолжение таблицы 7.3

Параметр	dz=0,1 м	dz=0,05 м	dz=0,025 м
Температура СТ на выходе из САОР, °C	417	417	417
Температура СТ на входе в активную зону, °C	418	418	419
Температура СТ на выходе из активной зоны, °C	533	533	534
Температура питательной воды на входе в ПГ, °C	340	340	340
Температура пара на выходе из ПГ, °C	505	505	505
Средняя температура топлива, °C	836	834	833
Максимальная температура топлива, °C	1071	1067	1066
Максимальная температура оболочки твэл, °C	621	619	620

Кроме того, были выполнены расчёты с уменьшением шага по времени. Результаты расчётов показали, что существенного влияния на основные параметры РУ в стационарном режиме уменьшение шага по времени не оказало.

Результаты моделирования

В соответствии с описанной в разделе 5 методикой были выбраны параметры для варьирования, приведённые в таблице 7.4, и выполнены многовариантные расчёты. Результаты расчётов представлены в таблице 7.5.

Таблица 7.4 – Перечень параметров, которые варьировались при выполнении расчётов

Параметр	Диапазон варьирования
Относительная частота вращения ГЦНА (отношение к номиналу)	0,95–1,05
Температура питательной воды на входе в ПГ, °C	335–345
Тепловая мощность в а.з. реактора, МВт	665–735
Диаметр таблетки в твэлах ЦЗ, мм	8,4–8,5
Диаметр таблетки в твэлах ПЗ, мм	9,2–9,3
Коэффициент для учёта погрешности корреляции по теплообмену со стенкой в а.з.	0,88–1,12

Продолжение таблицы 7.4

Параметр	Диапазон варьирования
Коэффициент для учёта погрешности корреляции по трению со стенкой в а.з.	0,9–1,1
Теплопроводность топлива, Вт/(м·К)	±8 %
Теплопроводность газового зазора, Вт/(м·К)	±3 %
Коэффициент для учёта погрешности корреляции по теплообмену со стенкой в ПГ со стороны свинцового теплоносителя	0,7–1,3
Коэффициент для учёта погрешности корреляции по теплообмену со стенкой в ПГ со стороны H ₂ O	0,9–1,1
Коэффициент учёта погрешности корреляции по трению со стенкой в ПГ со стороны H ₂ O	0,9–1,1
Коэффициент учёта погрешности корреляции по межфазному трению в ПГ для H ₂ O	0,9–1,1

Таблица 7.5 – Результаты моделирования режима работы РУ БРЕСТ-ОД-300 на номинальном уровне мощности

Параметр	Среднее значение	Максимальное значение	Минимальное значение	Неопределённость
Суммарный расход СТ через ГЦНА, т/с	45,2	47,6	43,0	±10 %
– Через фильтры	3,6	3,8	3,4	
– Через теплообменники САОР	6,8	7,2	6,5	
– Опускной участок	34,8	36,6	33,1	
Расход СТ через корзину а.з., т/с	41,6	43,7	38,8	±12 %
Расход СТ через ПГ (трубный пучок), кг/с	39,9	41,9	37,7	±11 %
Температура СТ на выходе из ПГ, °С	414	431	397	±17 °С

Продолжение таблицы 7.5

Параметр	Среднее значение	Максимальное значение	Минимальное значение	Неопределённость
Температура СТ на выходе из САОР, °C	417	432	400	± 16 °C
Температура СТ на входе в активную зону, °C	418	434	402	± 16 °C
Температура СТ на выходе из активной зоны, °C	533	556	511	± 23 °C
Средняя температура топлива, °C	880	944	818	± 63 °C
Максимальная температура топлива, °C	1134	1233	1048	± 93 °C
Максимальная температура оболочки ТВЭЛ, °C	621	650	591	± 30 °C

Анализ чувствительности показал, что наибольшее влияние на расчётные значения расходов СТ оказывает величина относительной частоты вращения ГЦНА, влияние остальных варьируемых параметров несущественно. На значения температуры СТ на выходе из ПГ, на выходе теплообменников САОР, на входе в а.з. значительное влияние оказывает величина тепловой мощности а.з., существенно меньшее влияние оказывает величина относительной частоты вращения ГЦНА, влияние остальных варьируемых параметров незначительно. Если рассматривать среднюю и максимальную температуры топлива, то на их значения существенное влияние оказывают величина диаметра таблетки, величина тепловой мощности а.з., теплопроводность топлива и газового зазора, влияние остальных варьируемых параметров несущественно. На максимальную температуру оболочки ТВЭЛ существенное влияние оказывают величины тепловой мощности а.з., относительной частоты вращения ГЦНА и множителя перед корреляцией по теплообмену со стенкой в а.з.

Выводы по результатам моделирования

В соответствии с международно признанными подходами к моделированию реакторных установок выполнена квалификация разработанной средствами интегрального программного комплекса ЕВКЛИД/V1 нодализационной схемы. Показано, что построенная расчётная модель хорошо описывает основные геометрические параметры моделируемого объекта. Выполнено

моделирование стационарного режима работы РУ БРЕСТ-ОД-300 на номинальном уровне мощности. Показано, что уменьшение размера расчётных ячеек в нодализационной схеме незначительно сказывается на результатах расчёта, так же как и использование уменьшенного значения шага по времени. Несмотря на то что рассматривается стационарный режим работы РУ, в коде ЕВКЛИД/V1 решается нестационарная система уравнений. Проверка сходимости решения по шагу по времени позволяет судить о качестве полученных результатов и устойчивости стационарного состояния. Определены параметры для выполнения многовариантных расчётов. Перечень параметров составлен на основе экспертных оценок и результатов анализа чувствительности, выполненного в ходе верификационных расчётов. Определены неопределённости расчёта основных параметров реакторной установки, составившие: по температуре свинцового теплоносителя на входе в а.з. ± 16 °С, максимальной температуре топлива ± 93 °С, максимальной температуре оболочки твэла ± 30 °С.

Ввод полного запаса положительной реактивности путём извлечения из активной зоны всех РО СУЗ с максимальной проектной скоростью при работе РУ на номинальной мощности со срабатыванием защиты ГЦНА

Описание режима

Исходным состоянием работы энергоблока для данного ННЭ является работа в стационарном режиме на номинальной мощности. В этом случае работа реакторной установки характеризуется максимальной удельной объёмной и линейной мощностью твэлов и минимальными запасами до предельных нагрузок. Исходным событием для рассматриваемого сценария является отказ СУЗ, при котором две группы РО АР с максимальной скоростью поочерёдно выводятся из а.з., что приводит к вводу положительной реактивности $0,65 \beta$. При этом на исходное событие накладывается отказ автоматической блокировки непрерывного вывода из а.з. РО АР более чем на 150 мм.

В качествеотягчающих режим обстоятельств, предполагается отключение ПГ по пару и воде (ОПЗ и ОЗПВ) со сбросом пара в атмосферу через ПУ ПГ после повышения температуры теплоносителя на выходе а.з. до 620 °С. В случае их отказа пар будет сброшен в атмосферу через ГПК. Это приводит к прекращению отвода тепла от первого контура и ещё большему его разогреву. Предусмотрено срабатывание защиты ГЦНА по повышению температуры теплоносителя на выходе ПГ до 520 °С, что приводит к прекращению принудительной циркуляции свинцового теплоносителя в а.з., одновременно СПОС пассивно вводит отрицательную реактивность.

Две петли САОР включаются по температуре СТ выше 460 °С на выходе свинцовых каналов САОР (предполагается отказ СНР и двух из четырёх петель САОР). При включении САОР начинают открываться задвижки воздушных каналов САОР и при достижении температуры СТ 500 °С на выходе каналов САОР открываются полностью.

Сценарий развития исходного события при наложении множественных отказов систем и оборудования для варианта с отключением ГЦНА приведён в таблице 7.6.

Таблица 7.6 – Сценарий развития исходного события

Последовательность событий срабатывания систем и оборудования с учётом проектной логики их функционирования	Учитываемые в сценариях отказы	Комментарий, экспертная оценка действий, последствий
1) Срабатывание БУСМ-4	Отказ	Рост мощности и температуры а.з.
2) Срабатывание ЭСМ	Отказ	Рост мощности и температуры а.з.
3) Срабатывание ЭСМ	Отказ	Рост мощности и температуры а.з.
4) Срабатывание БУСМ-4	Отказ	Рост мощности и температуры а.з.
5) ЭСМ	Отказ	Рост мощности и температуры а.з.
6) АЗ	Отказ	Рост мощности и температуры а.з.
7) АЗ	Отказ	Рост мощности и температуры а.з.
8) Срабатывание ПУ ПГ, ОПЗ и ОЗПВ, откл. ПГТН	Проектное функционирование	Рост мощности и температуры а.з., прекращение отвода тепла от первого контура

Продолжение таблицы 7.6

Последовательность событий срабатывания систем и оборудования с учётом проектной логики их функционирования	Учитываемые в сценариях отказы	Комментарий, экспертная оценка действий, последствий
9) ЭСМ	Отказ	Рост мощности и температуры а.з.
10) Отключение ГЦНА	Проектное функционирование	Переход на естественную циркуляцию, ухудшение теплоотвода от а.з., ввод отрицательной реактивности СПОС
11) ЭСМ	Отказ	Разогрев первого контура
12) СНР	Отказ	Разогрев первого контура
13) САОР	Отказ двух из четырёх петель САОР	Разогрев первого контура

Исключение вычислительных неопределённостей

Для обоснования используемой расчётной модели проведена серия расчётов с меньшими по сравнению с базовым вариантом шагами интегрирования по времени.

В базовом расчёте выбран шаг межмодульного обмена 0,05 с. Для проверки сходимости проведёны расчёты с шагом межмодульного обмена 0,025 с и 0,01 с, при этом максимальный шаг по времени теплогидравлического модуля также уменьшен в два и пять раз соответственно. Сравнение результатов расчётов для различных значений шага по времени представлено на рисунках 7.5–7.10.

Видно, что уменьшение шага по времени в два и пять раз не приводит к существенным изменениям полученных результатов.

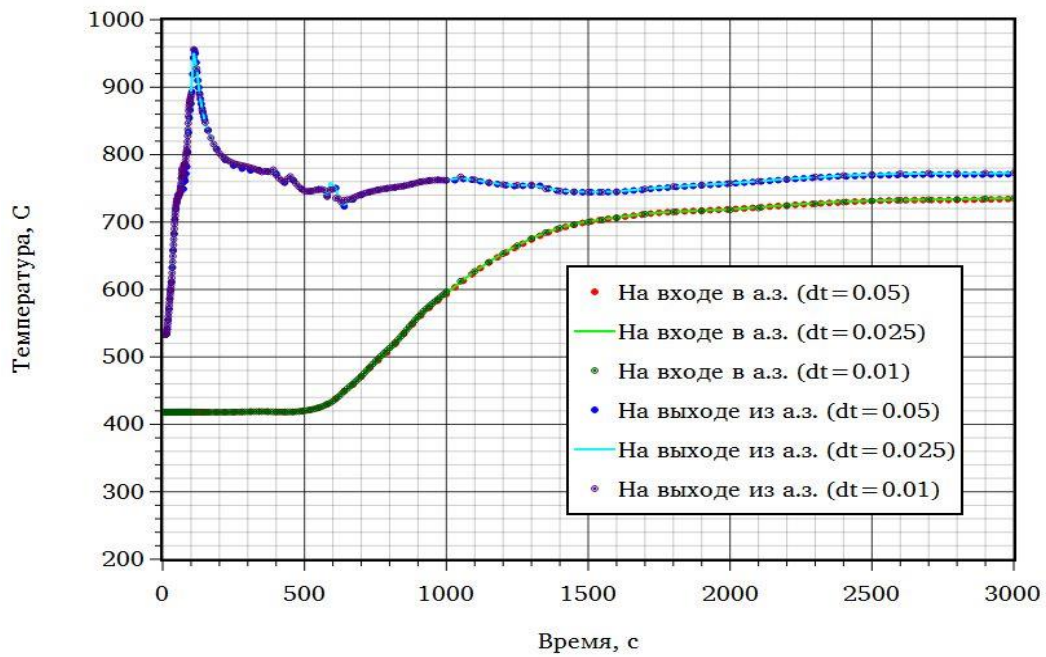


Рисунок 7.5 – Временные зависимости температуры СТ на входе и выходе а.з. для временных шагов 0,05 с, 0,025 с и 0,01 с

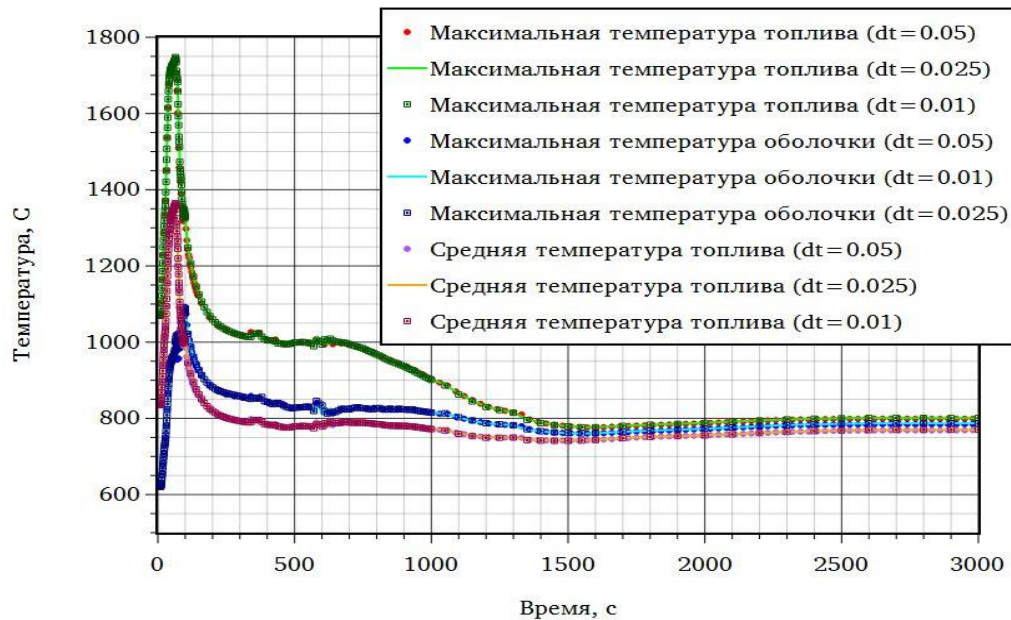


Рисунок 7.6 – Временные зависимости температуры топлива и оболочки твэла для временных шагов 0,05 с, 0,025 с и 0,01 с

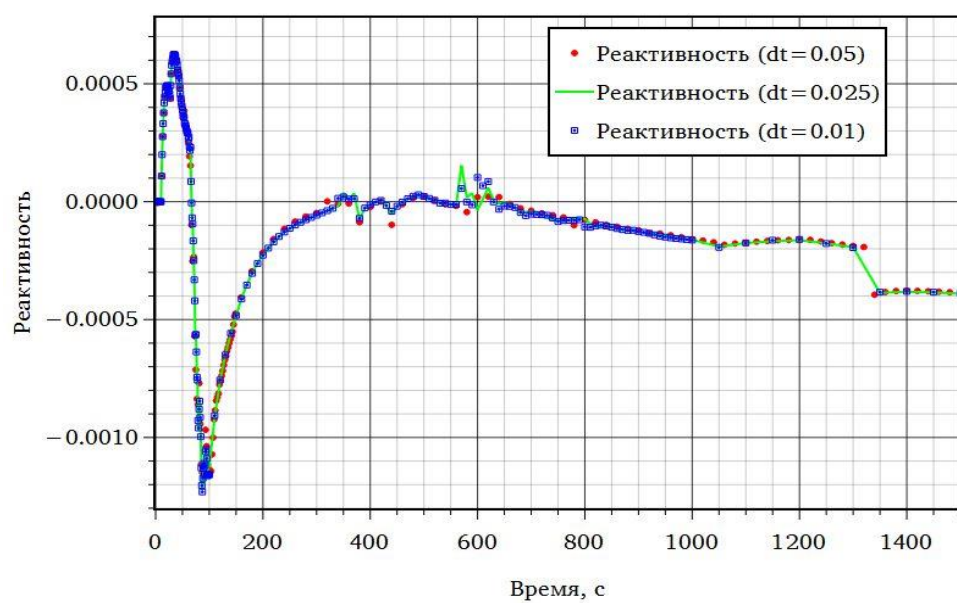


Рисунок 7.7 – Временные зависимости реактивности для временных шагов 0,05 с, 0,025 с и 0,01 с

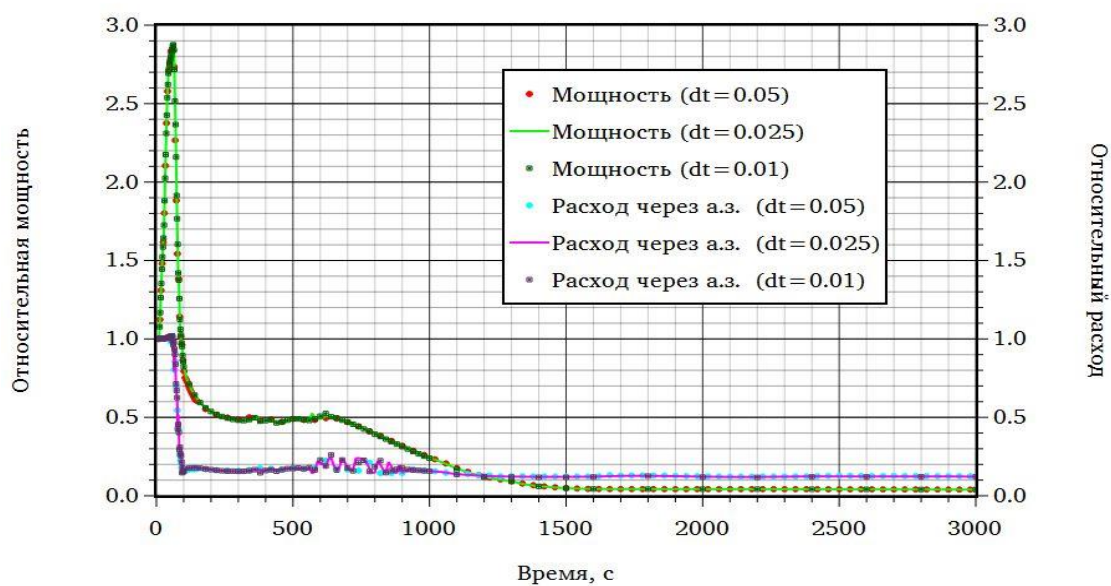


Рисунок 7.8 – Сравнительные временные зависимости мощности и расхода СТ через а.з. для временных шагов 0,05 с, 0,025 с и 0,01 с

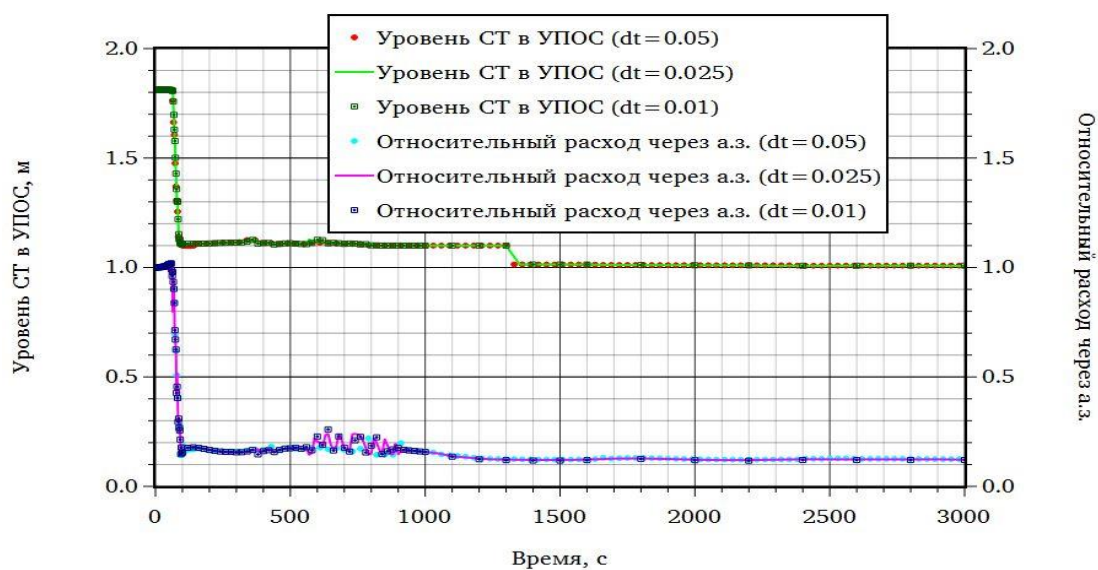


Рисунок 7.9 – Временные зависимости уровня свинца в УПОС и расхода через а.з. для временных шагов 0,05 с, 0,025 с и 0,01 с

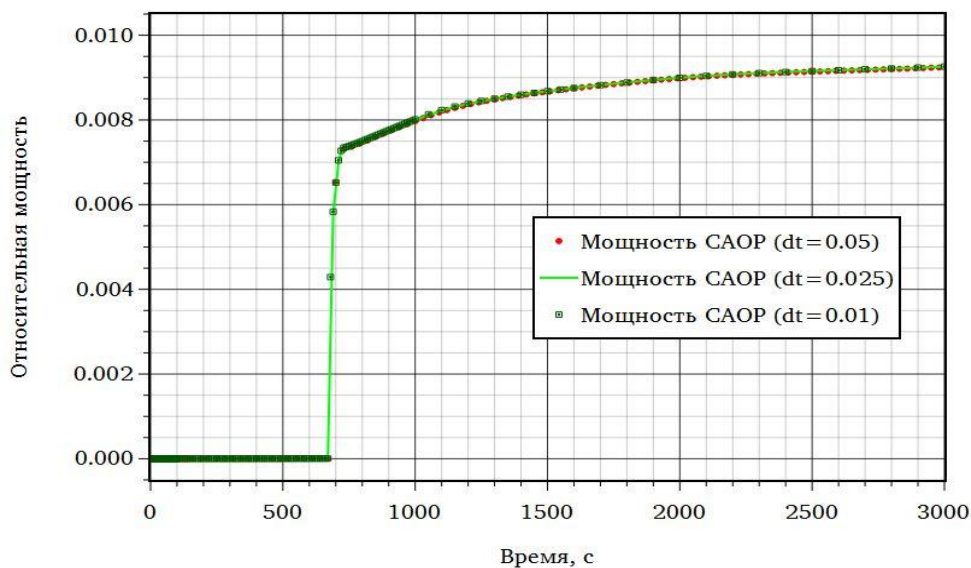


Рисунок 7.10 – Временные зависимости суммарной мощности САОР для временных шагов 0,05 с, 0,025 с и 0,01 с

Для обоснования используемой расчётной модели проведена серия расчётов со сгущением аксиальной сетки в а.з.

В базовом варианте активная часть а.з. разбивалась на 11 слоёв высотой 10 см каждый. Проведён расчёт с удвоенным числом узлов в активной части (22 слоя по 5 см), при этом временные шаги межмодульного обмена в обоих расчётах совпадали (0,05 с). Также проведён расчёт с уменьшением аксиальной сетки в активной части а.з. в четыре раза (44 слоя по 2,5 см). Сравнение полученных результатов представлено на рисунках 7.11–7.16.

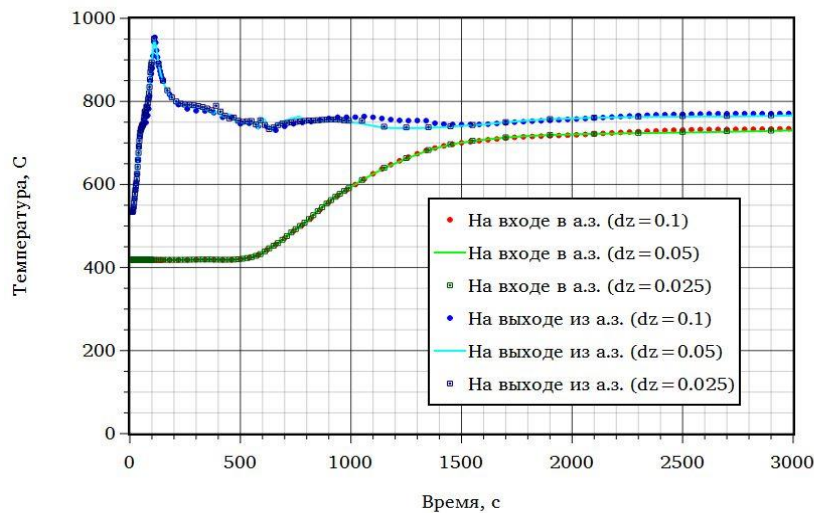


Рисунок 7.11 – Временные зависимости температуры СТ на входе и выходе а.з. для аксиальных сеток с шагами 0,1 м, 0,05 м и 0,025 м

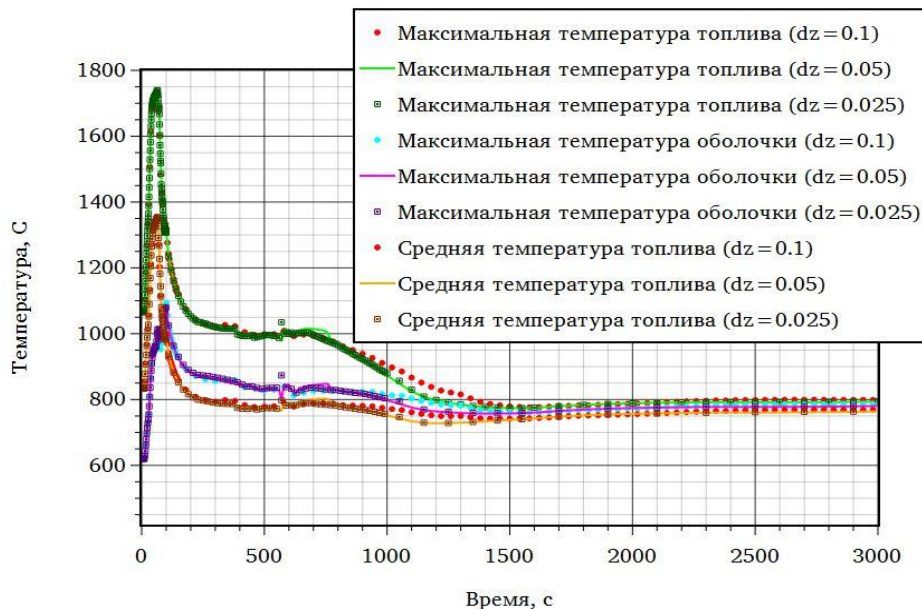


Рисунок 7.12 – Временные зависимости температуры топлива и оболочки твэла для аксиальных сеток с шагами 0,1 м, 0,05 м и 0,025 м

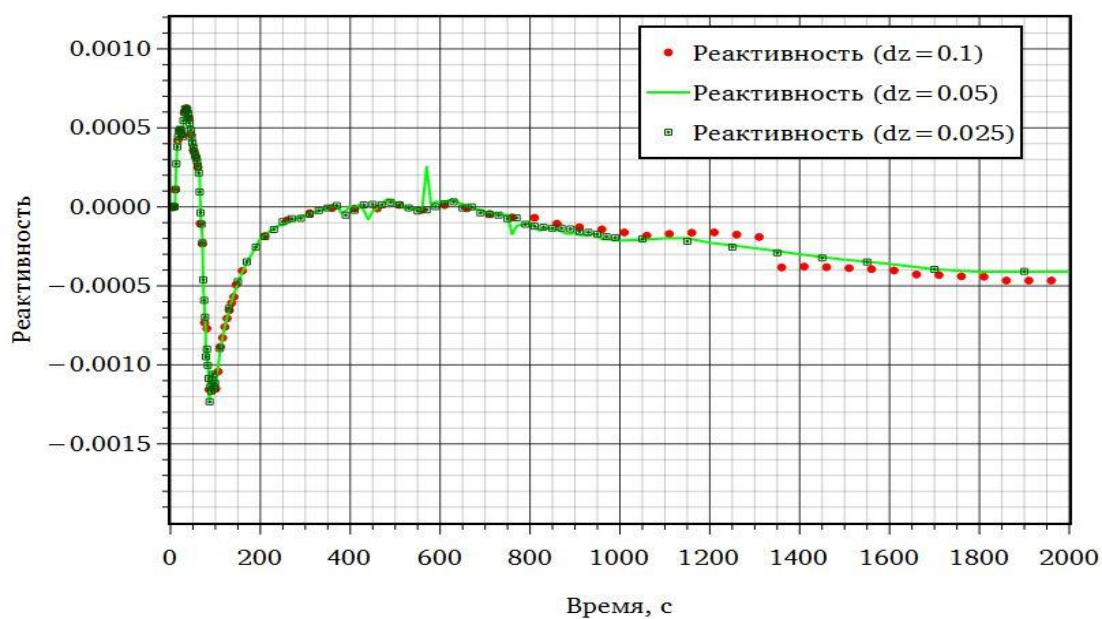


Рисунок 7.13 – Временные зависимости реактивности для аксиальных сеток с шагами 0,1 м, 0,05 м и 0,025 м

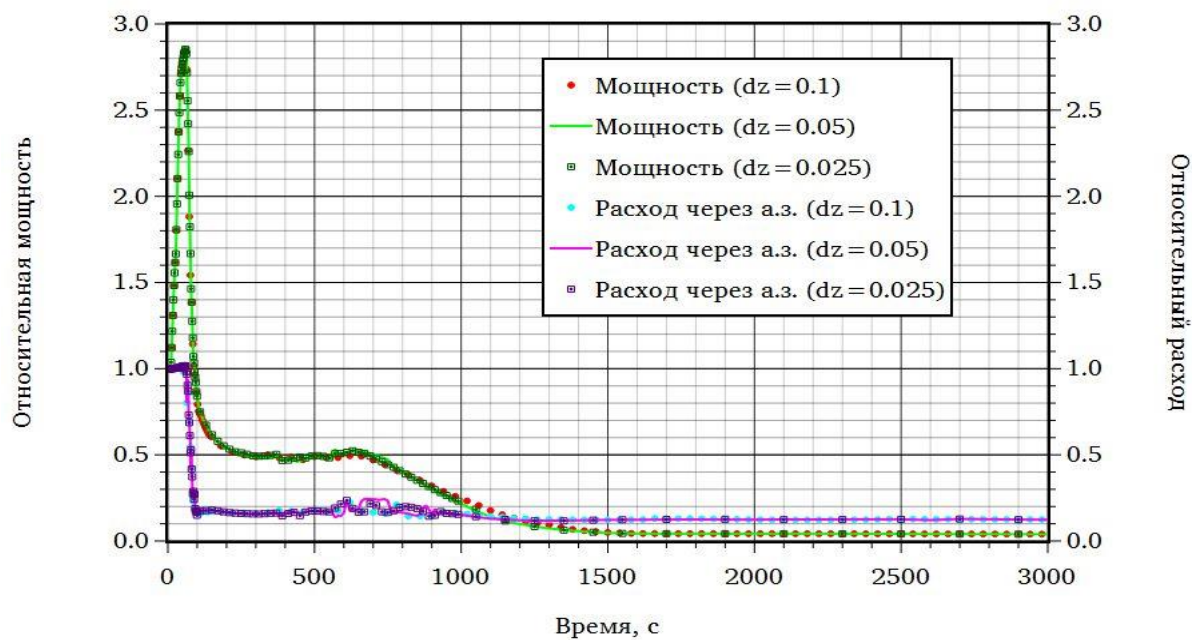


Рисунок 7.14 – Временные зависимости мощности и расхода СТ через а.з. для аксиальных сеток с шагами 0,1 м, 0,05 м и 0,025 м

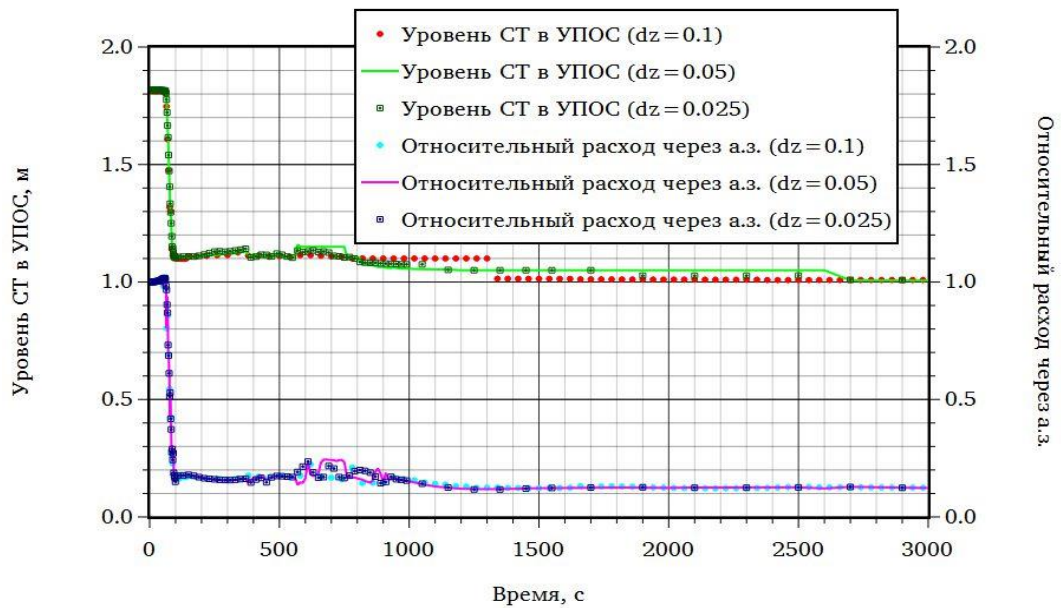


Рисунок 7.15 – Временные зависимости уровня свинца в УПОС и расхода через а.з. для аксиальных сеток с шагами 0,1 м, 0,05 м и 0,025 м

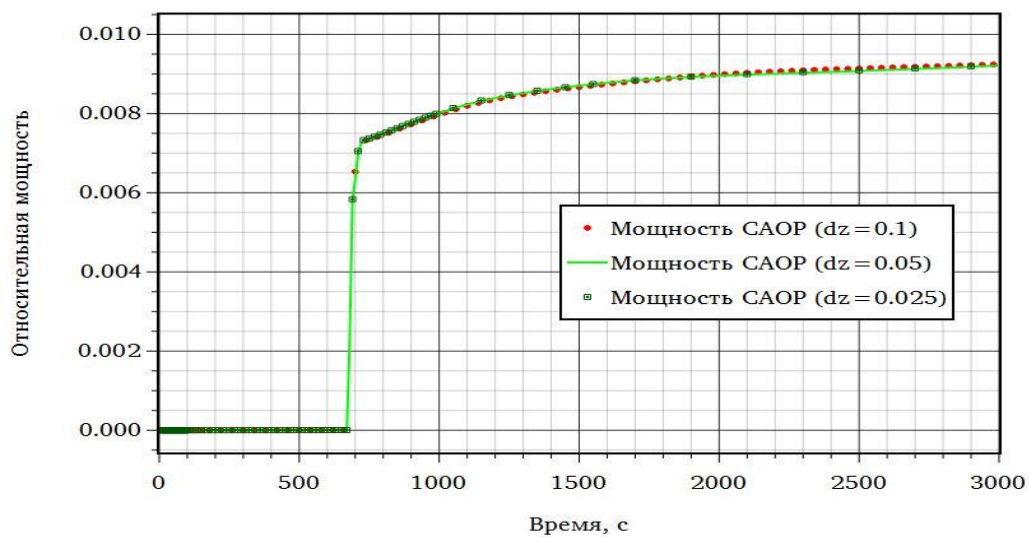


Рисунок 7.16 – Временные зависимости суммарной мощности САОР для аксиальных сеток с шагами 0,1 м, 0,05 м и 0,025 м

В целом результаты базового расчёта и расчётов с более детальными аксиальными сетками близки. Наблюдается некоторое отличие результатов с 550 по 1300 с, что, по-видимому, связано с колебаниями свободных уровней свинца в нестационарном процессе, которые, в свою очередь, вызывают изменение уровня в каналах УПОС и, как следствие,

изменение реактивности и мощности, а далее температур топлива, оболочки и СТ. При этом максимальные расхождения для различных аксиальных сеток по температурам топлива, оболочки и СТ не превышают 40, 25 и 20 °С соответственно.

Результаты моделирования

В соответствии с описанной в разделе 5 методикой были определены параметры для варьирования (таблица 7.7) и выполнены многовариантные расчёты.

Таблица 7.7 – Перечень параметров, которые варьировались при выполнении расчётов

Параметр	Диапазон варьирования
Относительная частота вращения ГЦНА (отношение к номиналу)	0,95–1,05
Температура питательной воды на входе в ПГ, °С	335–345
Тепловая мощность в а.з. реактора, МВт	665–735
Диаметр таблетки в твэлах ЦЗ, мм	8,4–8,5
Диаметр таблетки в твэлах ПЗ, мм	9,2–9,3
Коэффициент для учёта погрешности корреляции по теплообмену со стенкой в а.з.	0,88–1,12
Коэффициент для учёта погрешности корреляции по трению со стенкой в а.з.	0,9–1,1
Теплопроводность топлива, Вт/(м·К)	±8 %
Теплопроводность газового зазора, Вт/(м·К)	±3 %
Коэффициент для учёта погрешности корреляции по теплообмену со стенкой в ПГ со стороны свинцового теплоносителя	0,9–1,1
Коэффициент для учёта погрешности корреляции по теплообмену со стенкой в ПГ со стороны H ₂ O	0,9–1,1
Коэффициент учёта погрешности корреляции по трению со стенкой в ПГ со стороны H ₂ O	0,9–1,1
Коэффициент учёта погрешности корреляции по межфазному трению в ПГ для H ₂ O	0,9–1,1

На рисунках 7.17–7.27 приведены максимальные, минимальные и средние значения параметров, полученные в результате выполненного анализа неопределённостей. Ниже приведён анализ полученных результатов для среднего значения параметров. На 10 с начинают двигаться стержни АР первой группы, а на 45 с заканчивается движение стержней АР второй группы (рисунок 7.19). Из-за роста мощности (рисунок 7.18) резко возрастает температура свинца на выходе из а.з. (рисунок 7.19) и на 31 с происходит отключение ПГ (по уставке достижения температурой СТ на выходе а.з. 620 °С). Отключение ГЦНА (по уставке достижения температурой свинца на выходе из ПГ 520 °С в момент времени 58 с) приводит к вводу отрицательной реактивности за счёт снижения уровня свинца в каналах УПОС (рисунок 7.27) (из-за падения давления в напорном коллекторе), после чего реактор переходит в подкритическое состояние. Уровень свинца в каналах УПОС падает от начального 1,81 м до 1,1 м, а затем 1 м. Максимальная температура оболочки твэл достигает величины около 1080 °С к моменту времени 171 с (рисунок 7.22). После чего наблюдается снижение температуры топлива и оболочки в течение всего переходного режима (рисунки 7.21 – 7.23). В момент времени около 670 с начинают работать две из четырёх петель САОР (рисунок 7.26). После отключения ГЦНА расход свинца через а.з. снижается, РУ переходит в режим естественной циркуляции.

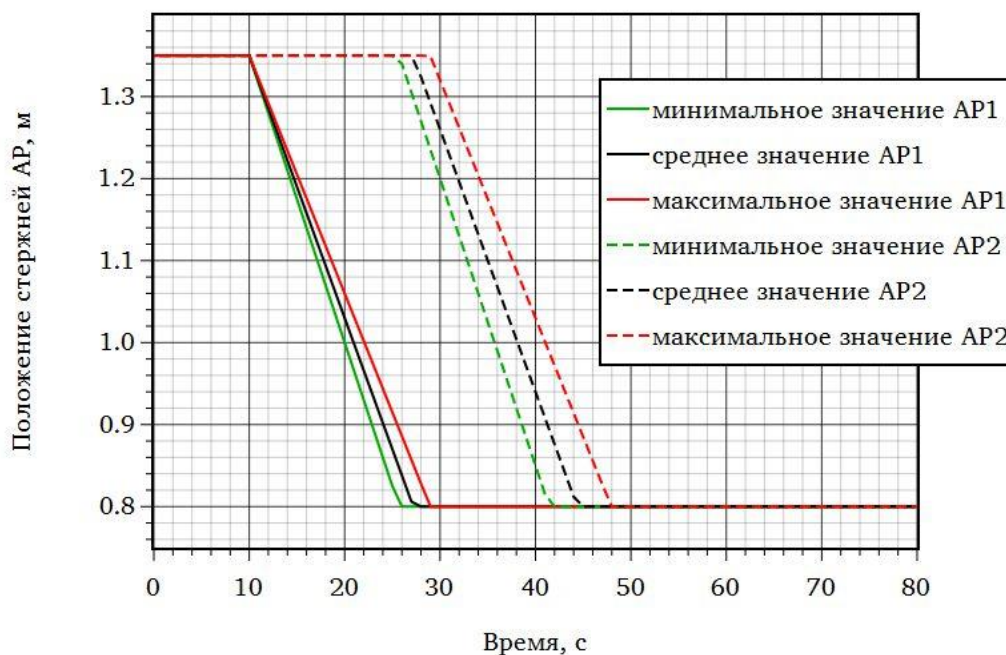


Рисунок 7.17 – Временная зависимость положения стержней АР

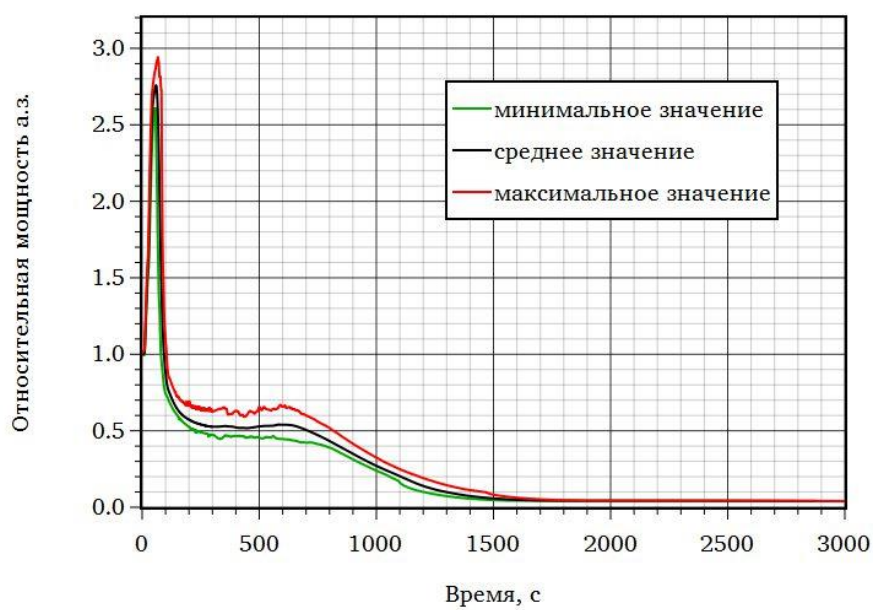


Рисунок 7.18 – Временные зависимости для относительной мощности а.з.

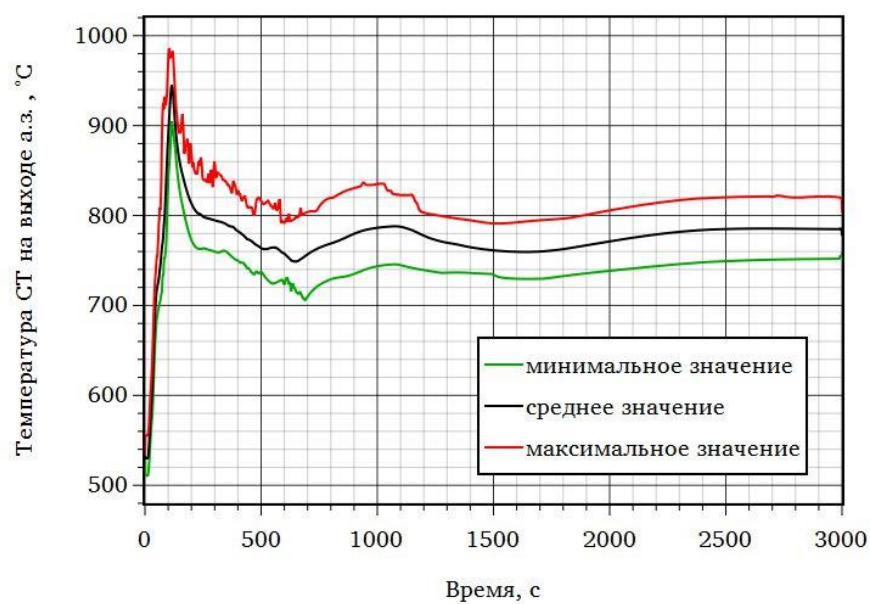


Рисунок 7.19 – Временные зависимости для температуры свинцового теплоносителя на выходе из а.з.

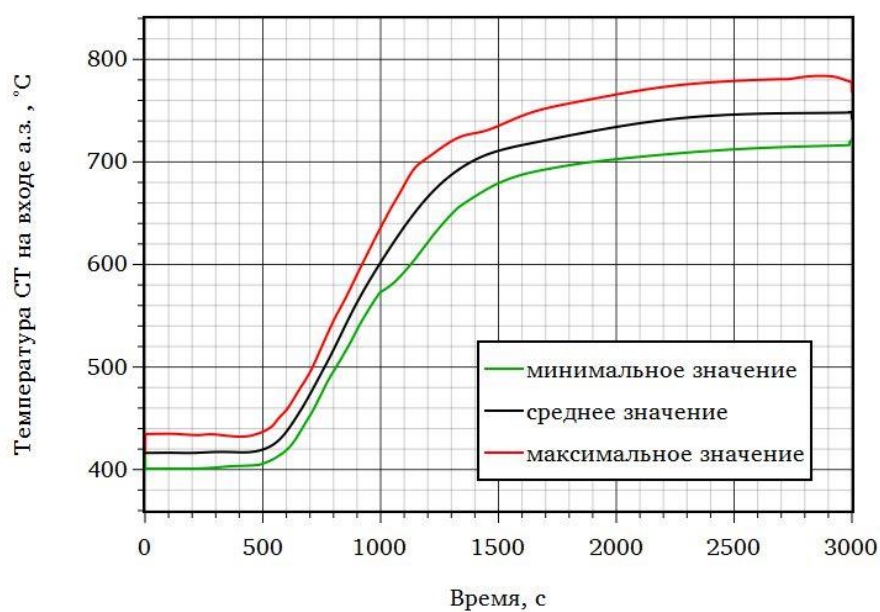


Рисунок 7.20 – Временные зависимости для температуры свинцового теплоносителя на входе в а.з.

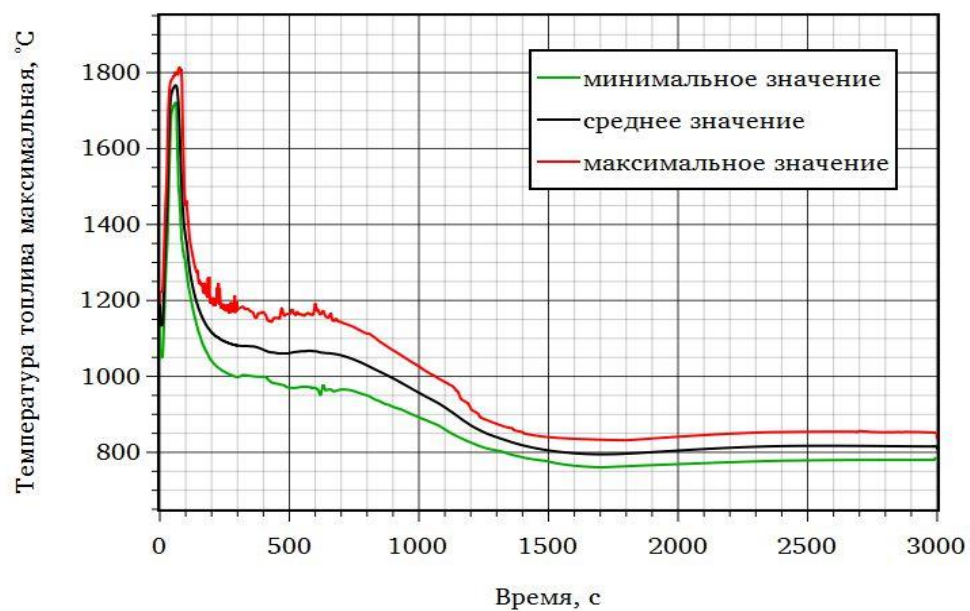


Рисунок 7.21 – Временные зависимости для максимальной температуры топлива

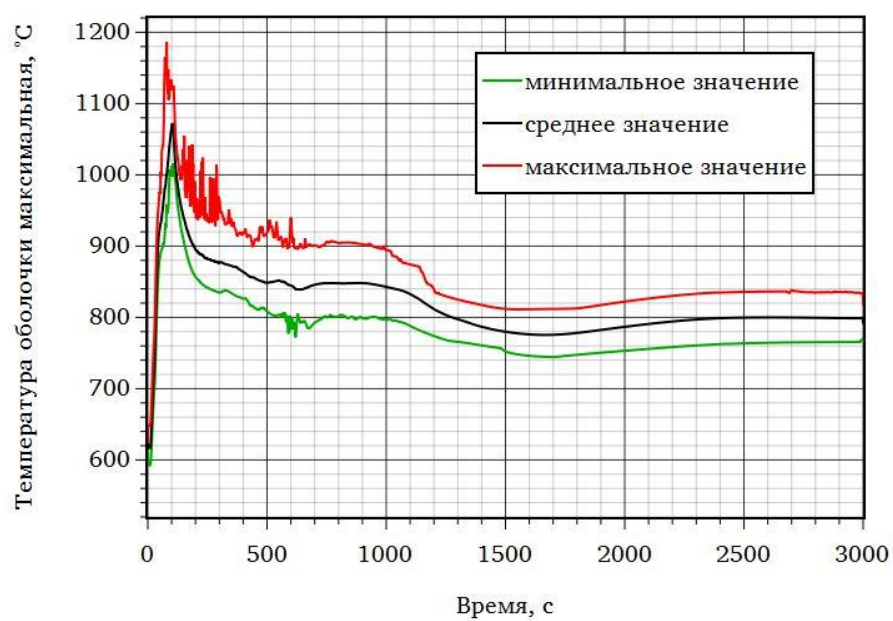


Рисунок 7.22 – Временные зависимости для максимальной температуры оболочки ТВЭЛ

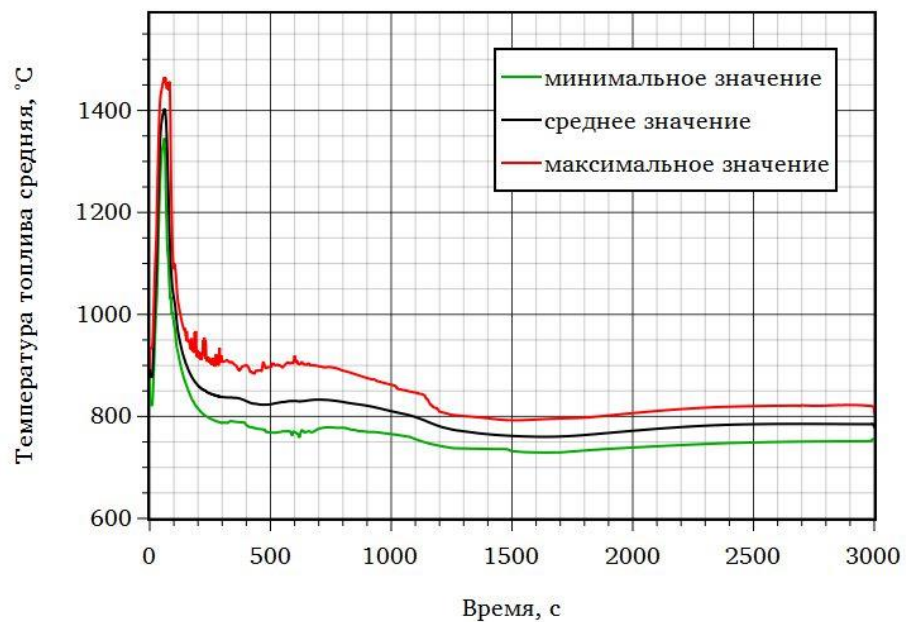


Рисунок 7.23 – Временные зависимости для средней температуры топлива

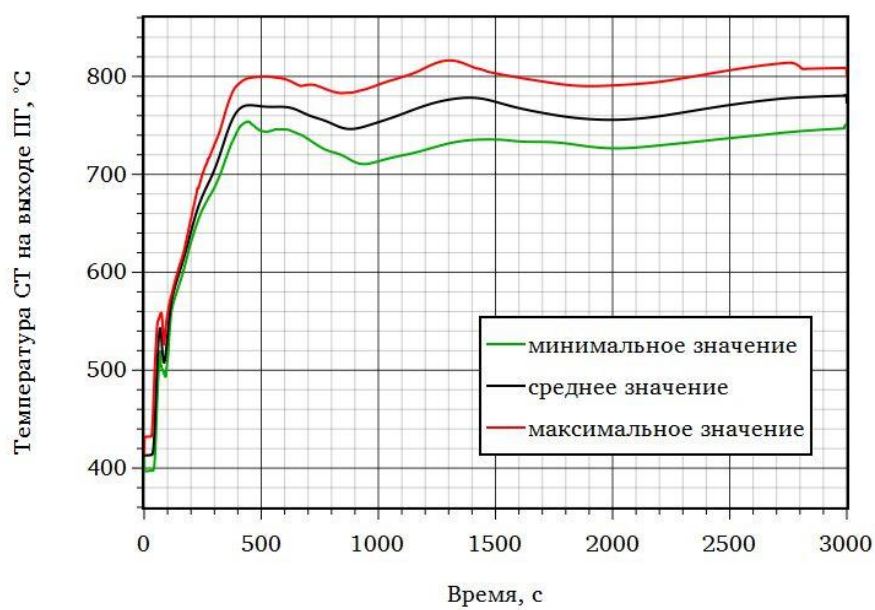


Рисунок 7.24 – Временные зависимости для температуры теплоносителя на выходе из ПГ

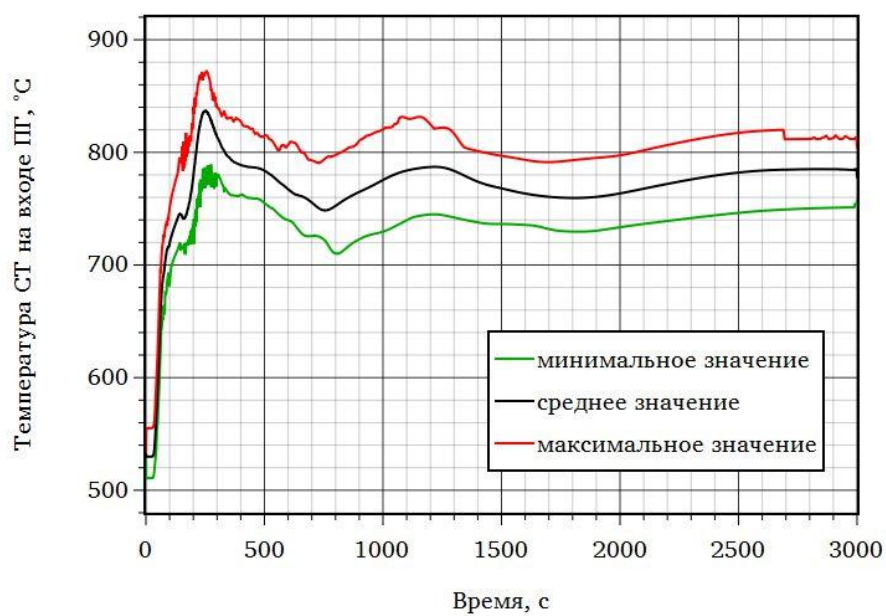


Рисунок 7.25 – Временные зависимости для температуры теплоносителя на входе в ПГ

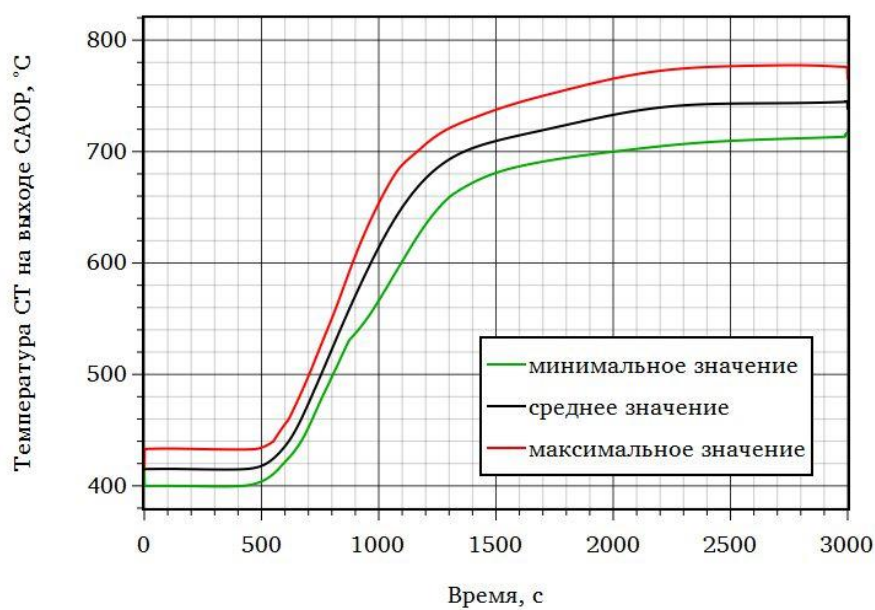


Рисунок 7.26 – Временные зависимости для температуры теплоносителя на выходе из САОР

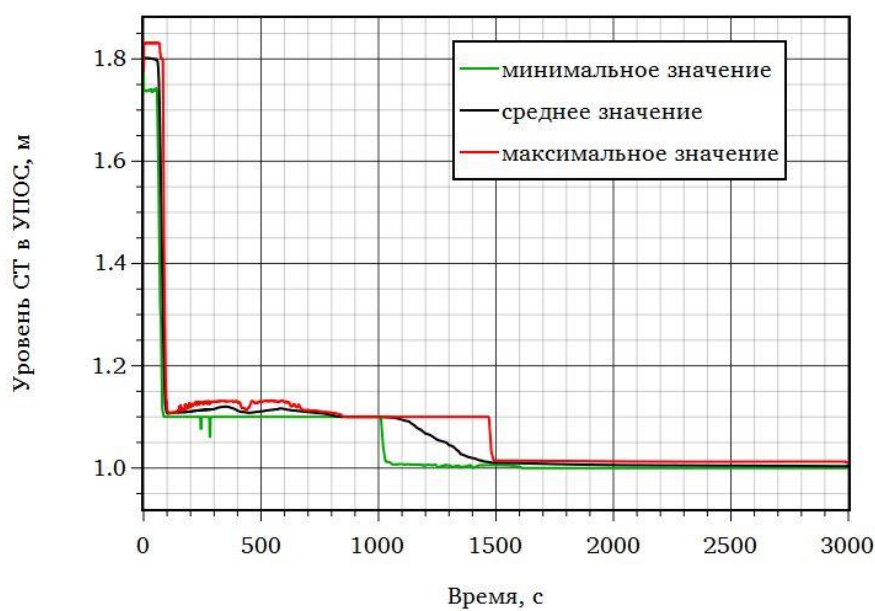


Рисунок 7.27 – Временные зависимости для уровня СТ в УПОС

Выводы по результатам моделирования

В расчёте данного сценария ННЭ максимальная температура оболочки твэла превышала значение 1000 °С в течение 49 с для среднего значения, что является превышением предела безопасной эксплуатации по температуре оболочки в соответствии с техническим заданием на реакторную установку. Однако максимальная температура оболочки не превысила температуру плавления. Также превышение предела безопасной эксплуатации в ходе расчёта данного сценария ННЭ наблюдалось и для температуры свинцового теплоносителя на входе в ПГ. При этом неопределённости вычисления отдельных параметров следующие:

- максимальной температуры топлива ± 94 °С;
- максимальной температуры оболочки твэла ± 46 °С;
- температуры свинцового теплоносителя на выходе из а.з. ± 39 °С.

Также было получено, что диаграммы чувствительности существенно зависят от времени.

Режим, вызванный исходным событием «разрыв трубки парогенератора»*Описание режима*

Рассматривается течь парогенератора РУ БРЕСТ-ОД-300, вызванная гильотинным разрывом одной из теплообменных трубок в нижней части ПГ. При разрыве трубки в свинец истекает насыщенная пароводяная смесь. Предполагается, что в свинец поступает пароводяная смесь с постоянным заданным массовым расходом 0,7 кг/с и с энтальпией на линии насыщения. Значение массового расхода, использовавшееся при выполнении расчётов в качестве исходных данных, получено специалистами АО «НИКИЭТ».

Исходным состоянием для данного ННЭ является работа РУ в стационарном режиме на номинальном уровне мощности. В момент времени 10 с в первый контур с заданным расходом начинает поступать водяной пар с указанным выше расходом, при этом РУ продолжает работать в заданном режиме. При достижении в газовой полости реактора давления 0,115 МПа проходит сигнал на отсечение всех ПГ по пару и питательной воде, при этом открываются ПУ ПГ, и срабатывает система экстренного снижения мощности (ЭСМ). При достижении давления в газовой полости 0,13 МПа срабатывает система аварийной защиты реактора. Работа других систем автоматики в данном расчёте не моделировалась. Расчёты проводились до момента срабатывания системы аварийной защиты реактора.

Исключение вычислительных неопределённостей

С целью обоснования выбранной расчётной модели был проведён анализ сходимости результатов расчётов по временному шагу. Выполнена серия расчётов с уменьшенным максимальным расчётным шагом, в которых шаг интегрирования по времени уменьшался в 2 и 4 раза относительно базового (10^{-5} с).

Динамика изменения во времени величины давления в газовой полости реактора и расхода теплоносителя на входе в а.з., объёмного содержания пара по высоте подъёмной и опускной части ПГ на 28-ю секунду процесса не претерпевают существенных изменений при использовании различных значений временного шага (рисунки 7.28–7.31).

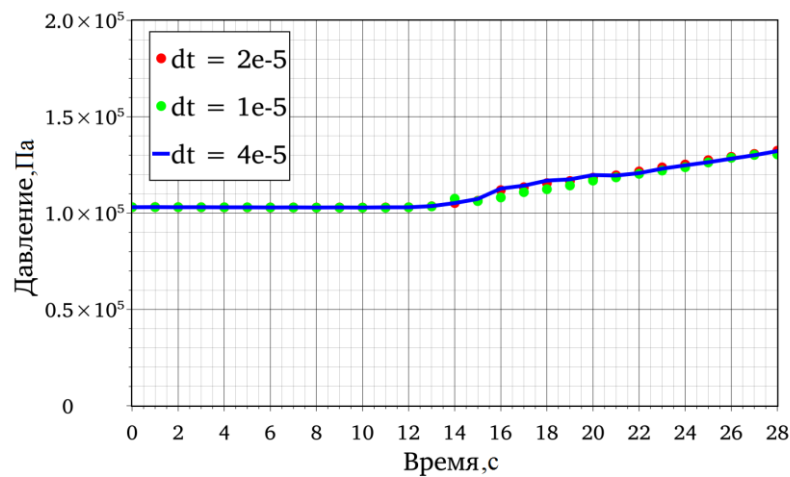


Рисунок 7.28 – Давление в газовой полости реактора в расчётах с различными временными шагами

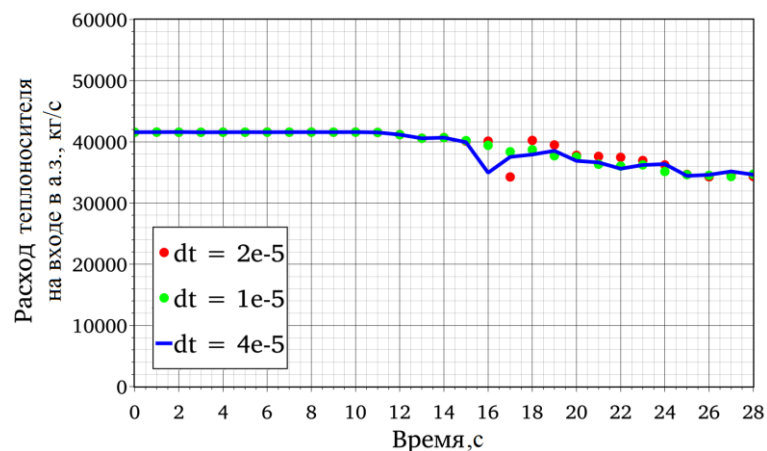


Рисунок 7.29 – Массовый расход теплоносителя на входе в а.з. в расчётах с различными временными шагами

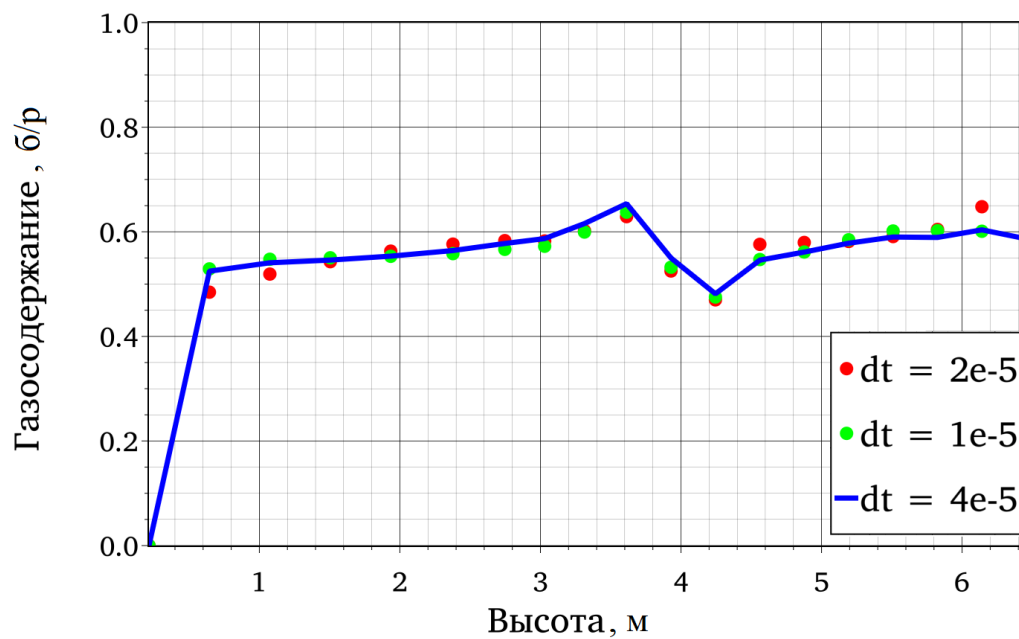


Рисунок 7.30 – Распределение объёмного содержания пара в смеси «свинец–водяной пар» по высоте подъёмной части ПГ в расчётах с различными временными шагами

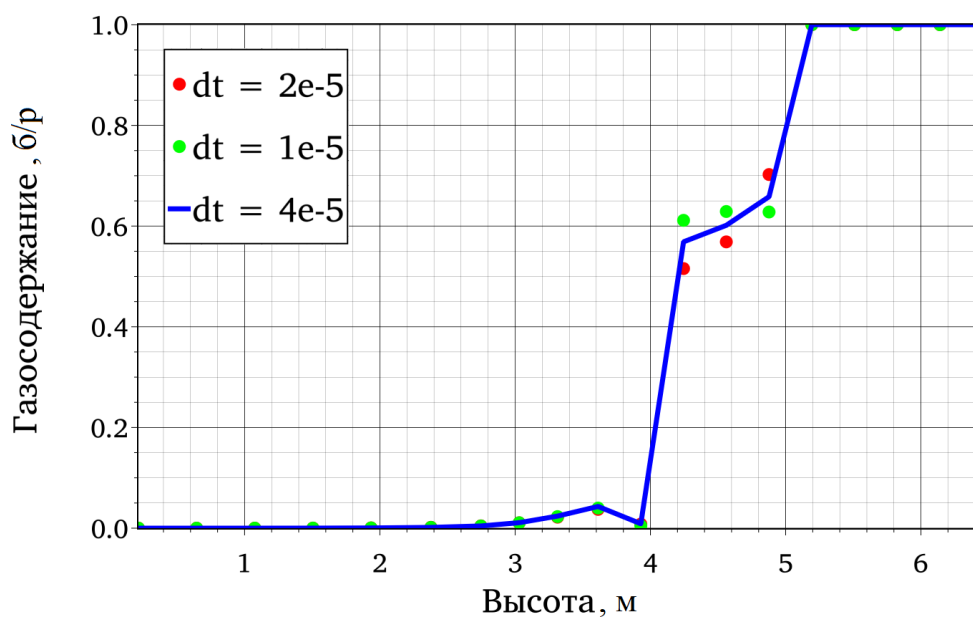


Рисунок 7.31 – Распределение объёмного содержания пара в смеси «свинец–водяной пар» по высоте опускной части ПГ в расчётах с различными временными шагами

Был выполнен анализ сходимости результатов расчётов по аксиальной сетке. Проведена серия расчётов с увеличенным количеством расчётных ячеек в подъёмной части ПГ в 2 и 4 раза. Получены аналогичные результаты, что и при изменении шага по времени (рисунки 7.32–7.34).

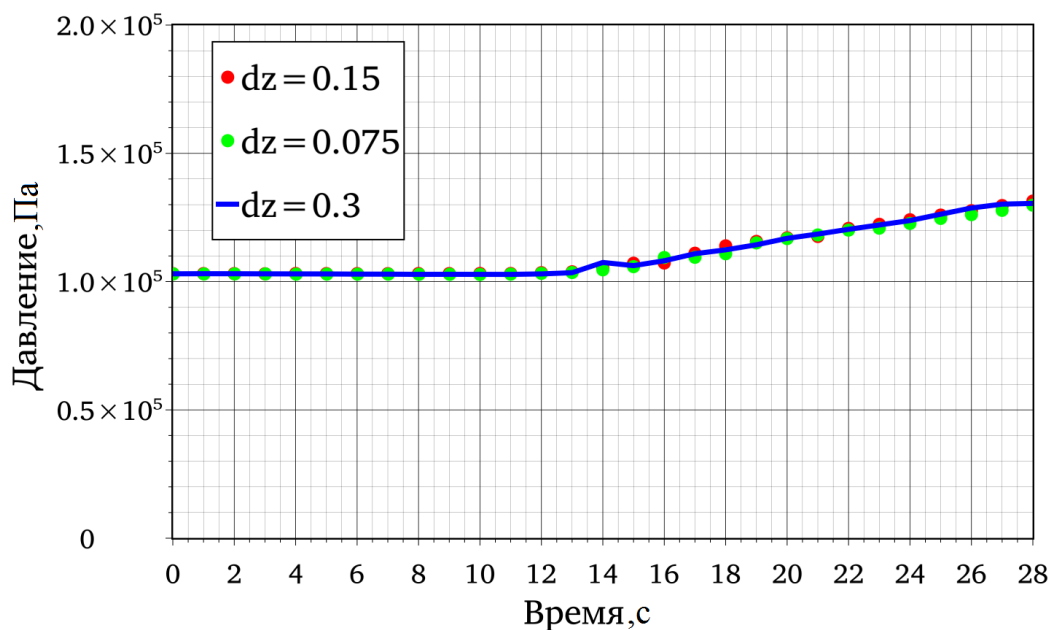


Рисунок 7.32 – Давление в газовой полости реактора в расчётах с различными размерами расчётных ячеек

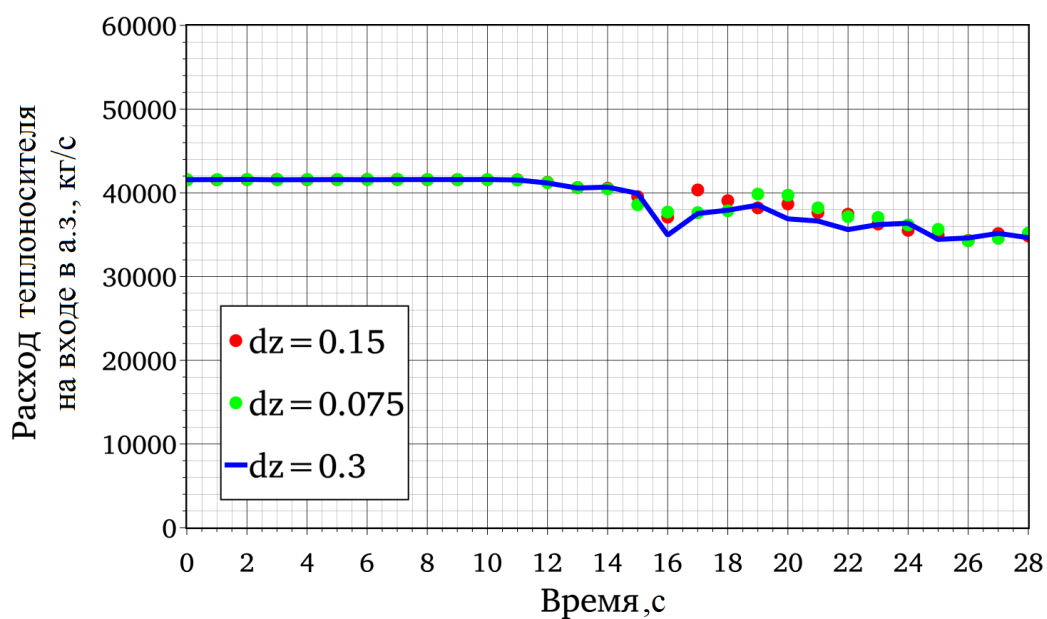


Рисунок 7.33 – Массовый расход теплоносителя на входе в а.з. в расчётах с различными размерами расчётных ячеек

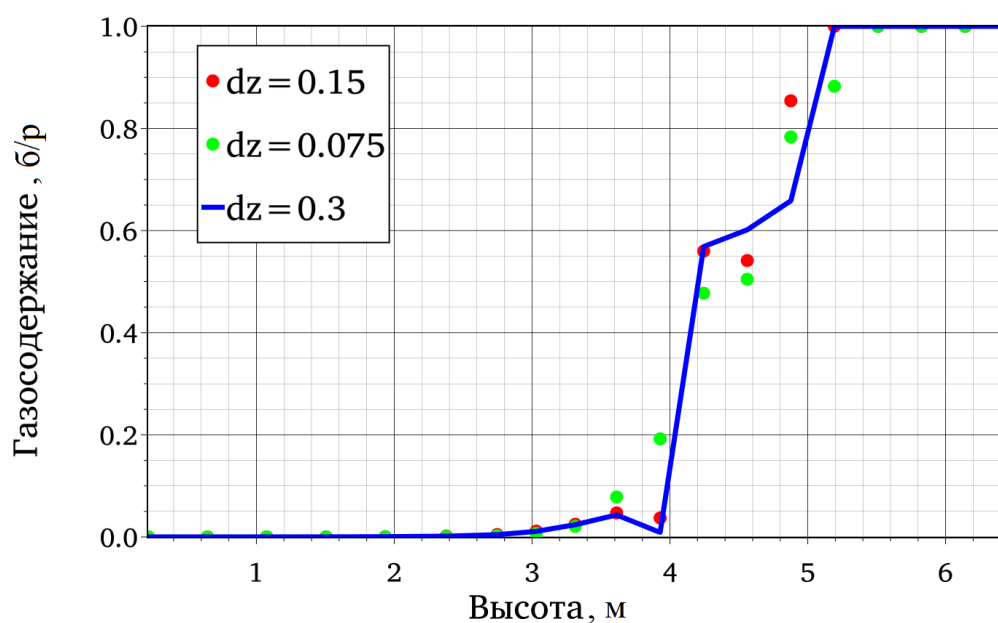


Рисунок 7.34 – Распределение объёмного содержания пара в смеси «свинец–водяной пар» по высоте опускной части ПГ в расчётах с различными размерами расчётных ячеек

Результаты моделирования

Для оценки неопределённостей была выполнена серия многовариантных расчётов с варьированием параметров, приведённых в таблице 7.8.

Таблица 7.8 – Перечень параметров, которые варьировались при выполнении расчётов

Параметр	Диапазон варьирования
Относительная частота вращения ГЦНА (отношение к номиналу)	0,95–1,05
Температура питательной воды на входе в ПГ, °C	335–345
Тепловая мощность в а.з. реактора, МВт	665–735
Диаметр таблетки в твэлах ЦЗ, мм	8,4–8,5
Диаметр таблетки в твэлах ПЗ, мм	9,2–9,3
Коэффициент для учёта погрешности корреляции по теплообмену со стенкой в а.з.	0,88–1,12
Коэффициент для учёта погрешности корреляции по трению со стенкой в а.з.	0,9–1,1

Продолжение таблицы 7.8

Параметр	Диапазон варьирования
Теплопроводность топлива, Вт/(м·К)	±8 %
Теплопроводность газового зазора, Вт/(м·К)	±3 %
Коэффициент для учёта погрешности корреляции по теплообмену со стенкой в ПГ со стороны свинцового теплоносителя	0,9–1,1
Коэффициент для учёта погрешности корреляции по теплообмену со стенкой в ПГ со стороны H ₂ O	0,9–1,1
Коэффициент учёта погрешности корреляции по трению со стенкой в ПГ со стороны H ₂ O	0,9–1,1
Коэффициент учёта погрешности корреляции по межфазному трению в ПГ для H ₂ O	0,9–1,1
Массовый расход водяного пара в сечении разрыва, кг/с	0,6–0,8
Температура водяного пара в сечении разрыва, К	615–635

На рисунках 7.35–7.40 представлены результаты моделирования (средние, минимальные и максимальные значения расчётных параметров). Анализ результатов приведён для средних значений.

Давление в газовой полости достигает 0,115 МПа на 15-й секунде, 0,13 МПа – на 27,5 с (рисунок 7.35). После достижения давлением величины 0,115 МПа снижаются обороты ГЦНА (рисунок 7.36) и расход питательной воды в ПГ. После прохождения сигнала достижения давлением 0,13 МПа в активную зону вводятся органы аварийной защиты, и реактор останавливается. Моделирование данного режима выполнено до момента срабатывания АЗ для среднего значения (то есть до 28 с). Массовый расход теплоносителя на входе в а.з. соответствует динамике изменения давления (рисунок 7.37).

Температура СТ на входе в а.з. остаётся постоянной. Температура на выходе снижается ввиду снижения мощности РУ (рисунок 7.38). Временная зависимость интегральной мощности реактора представлена на рисунке 7.39. Максимальная температура топлива также уменьшается в виду снижения мощности РУ (рисунок 7.40).

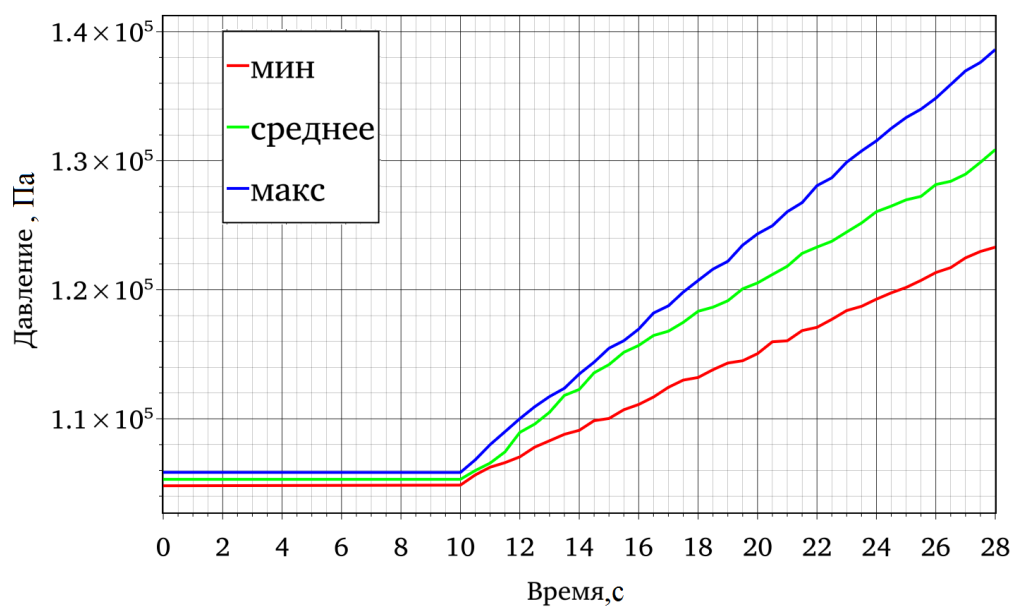


Рисунок 7.35 – Давление в газовой полости реактора

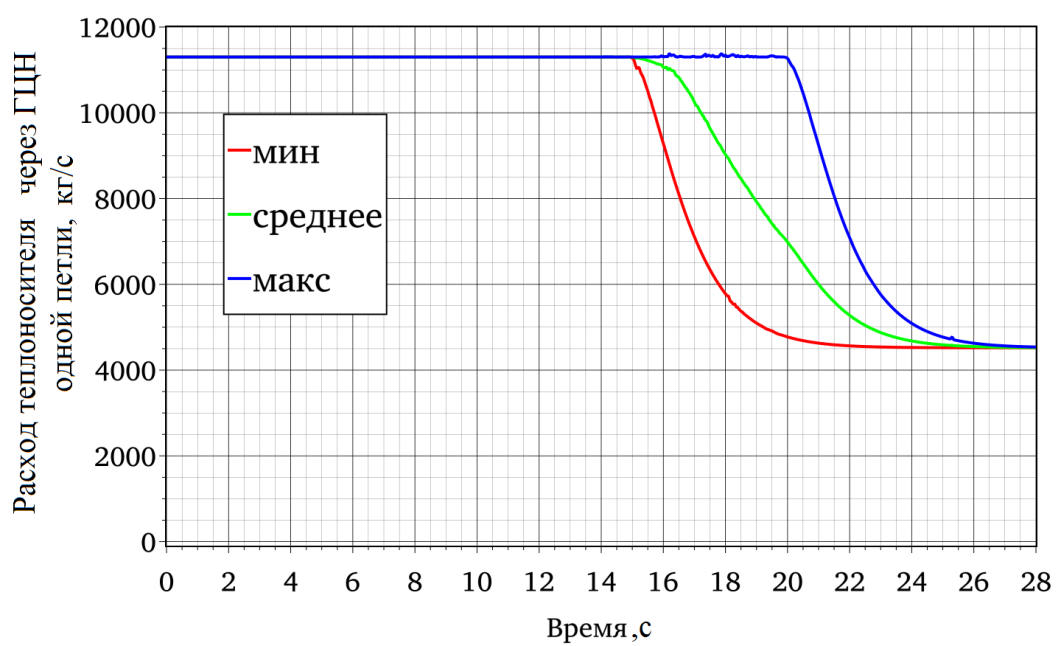


Рисунок 7.36 – Расход теплоносителя через ГЦН одной петли

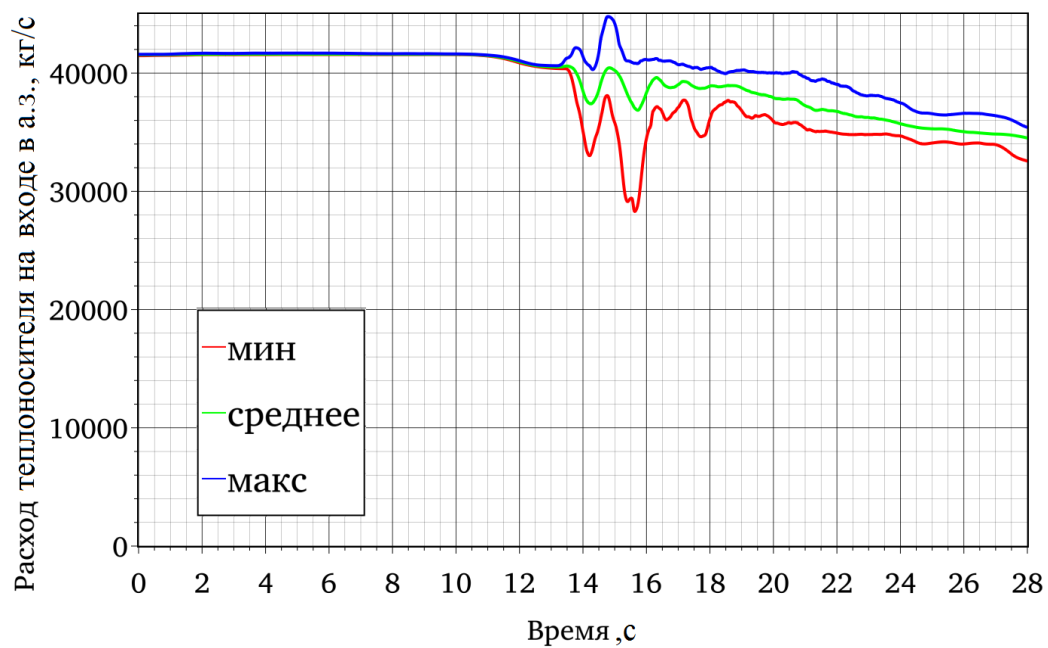


Рисунок 7.37 – Массовый расход теплоносителя на входе в а.з.

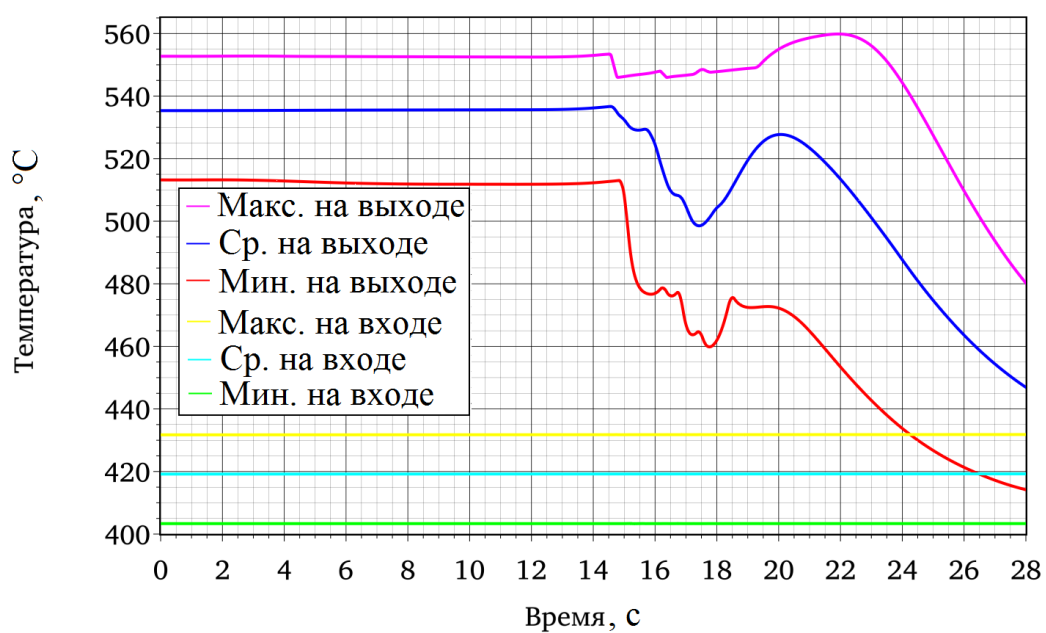


Рисунок 7.38 – Температура свинцового теплоносителя на входе и выходе из а.з.

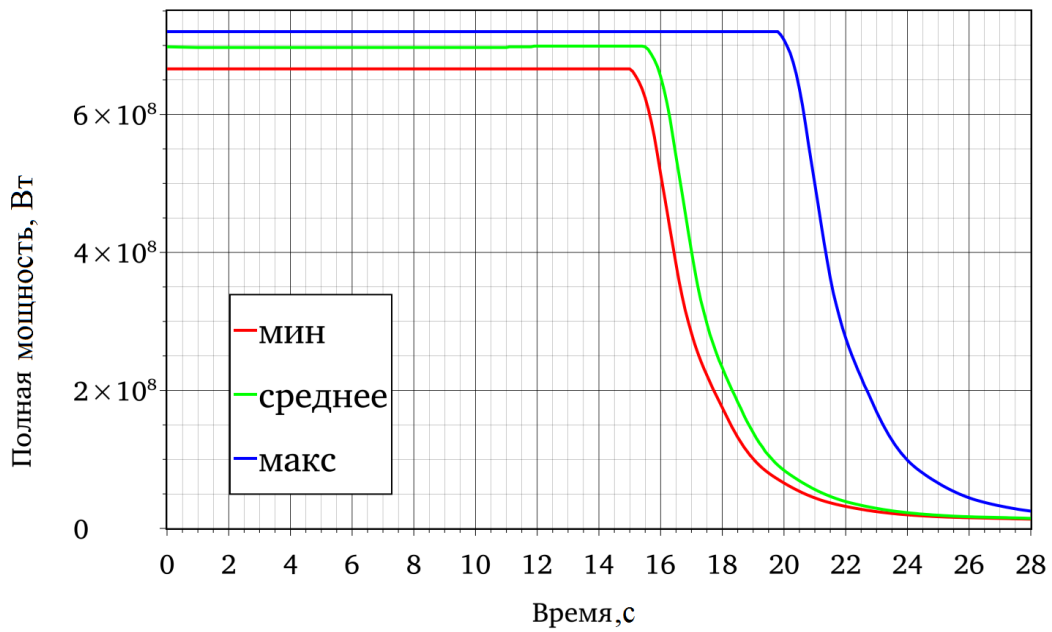


Рисунок 7.39 – Интегральная мощность реактора

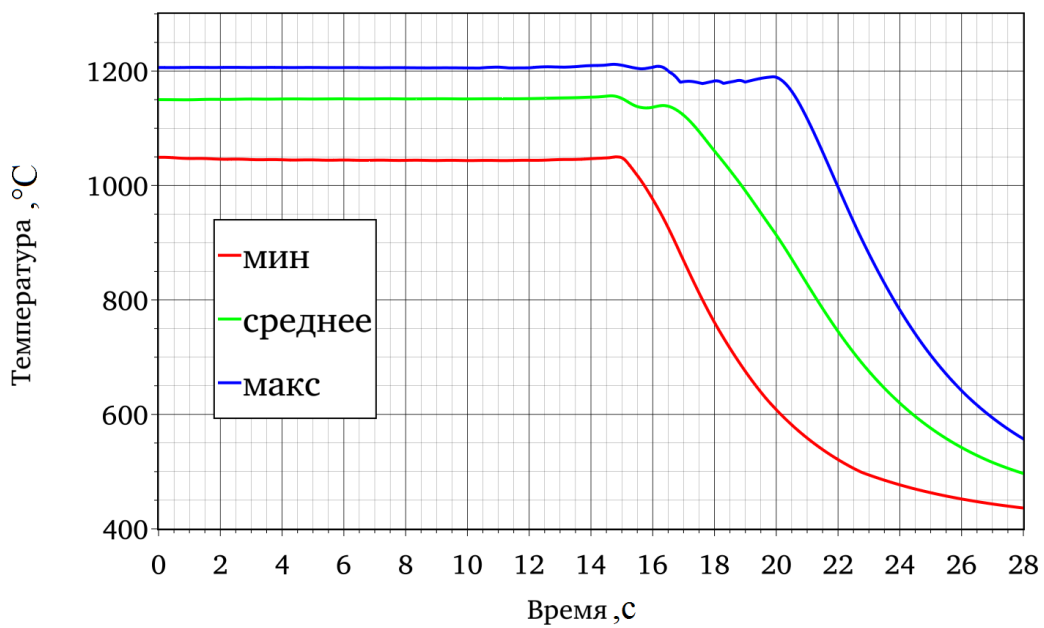


Рисунок 7.40 – Максимальная температура топлива

Ниже представлены результаты расчёта средних значений. Начиная с 10 с (момент возникновения течи), газосодержание в подъёмной части ПГ (в которой расположено место возникновения течи) начинает увеличиваться по всей высоте (рисунок 7.41). Можно заключить, что пар поднимается в верхнюю часть ПГ. Данное предположение подтверждается зависимостью газосодержания в нижней части ПГ от времени (рисунок 7.42), которое имеет

отличные от нуля значения только в начальный период времени после возникновения течи, при этом максимальное значение газосодержания не превышает $5 \cdot 10^{-5}$. Пар из нижней части ПГ попадает как в подъёмную, так и в опускную части ПГ. Из опускной части ПГ пар поднимается в газовую полость реактора, что подтверждается изменением пространственного распределения объёмного содержания пара во времени (рисунок 7.43).

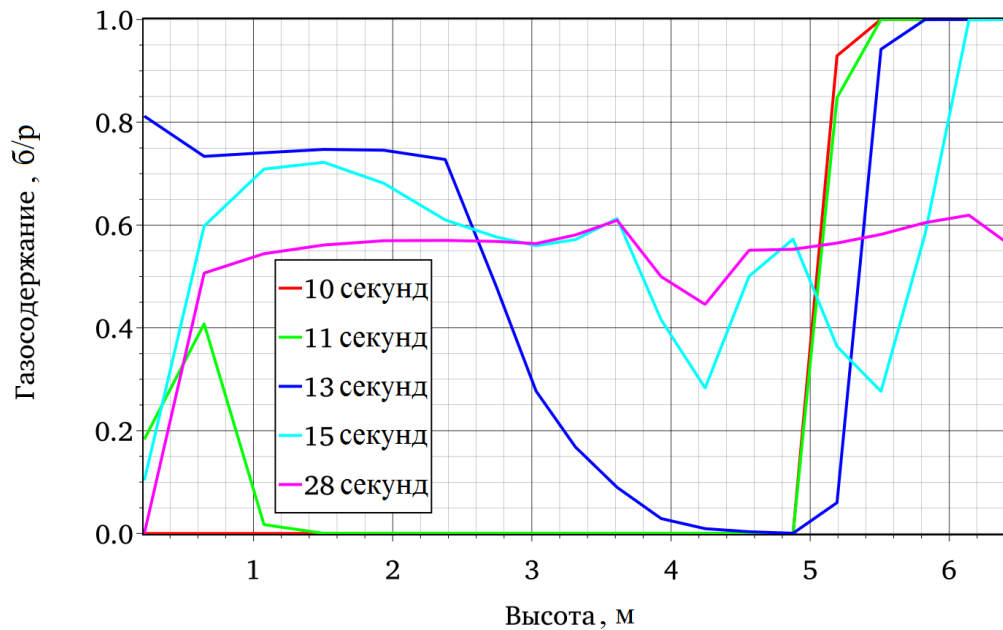


Рисунок 7.41 – Распределение объёмного содержания пара в смеси «свинец-водяной пар» по высоте подъёмной части ПГ (отметка «0 м» соответствует месту истечения)

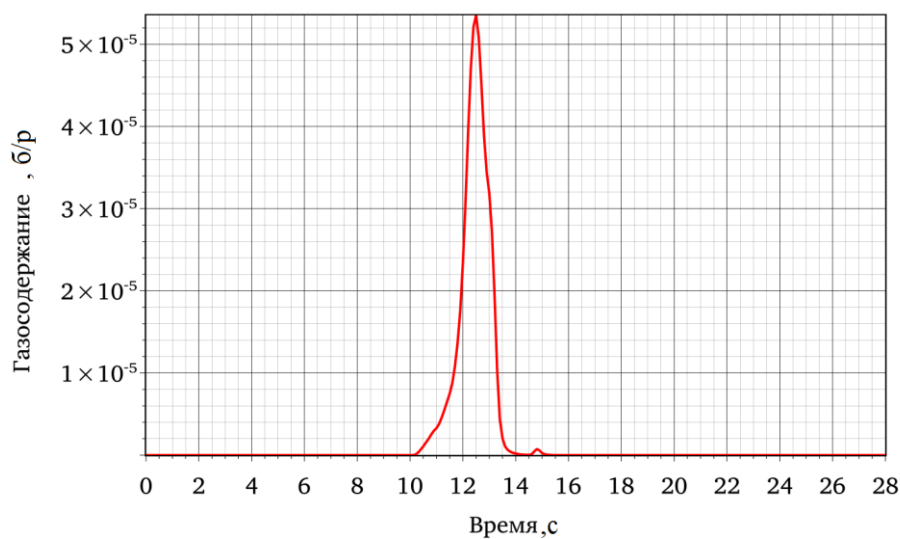


Рисунок 7.42 – Объёмное содержание пара в смеси «свинец-водяной пар» в нижней части ПГ (ниже места разрыва на 0,6 м)

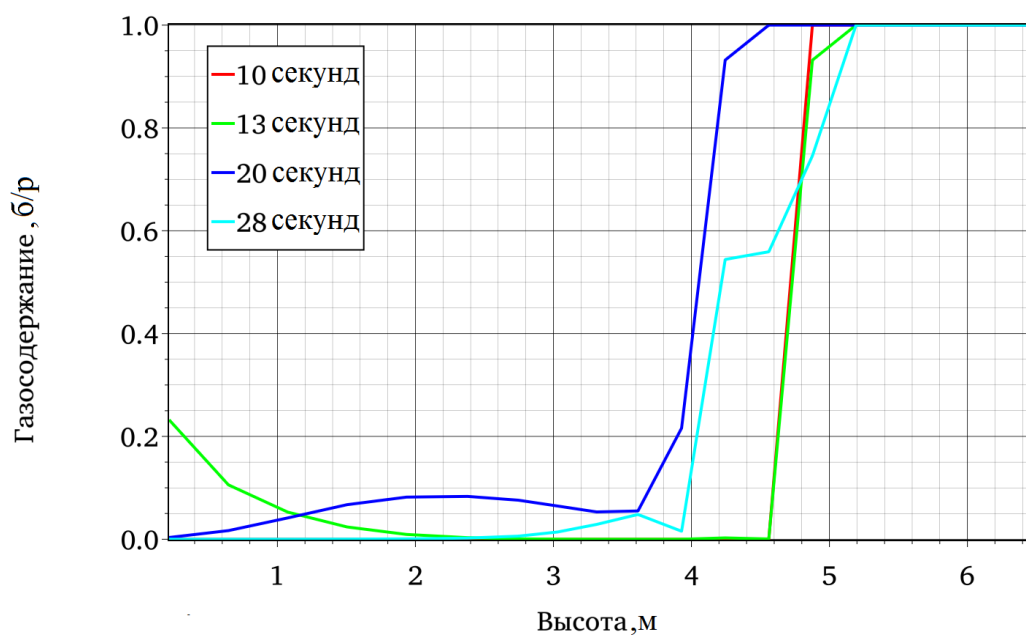


Рисунок 7.43 – Распределение объёмного содержания пара в смеси «свинец–водяной пар» по высоте опускной части ПГ

Как следует из рисунка 7.44, на котором приведена зависимость газосодержания в канале подачи свинца от времени, часть пара из подъемной части ПГ попадает в канал подачи свинца в ПГ.

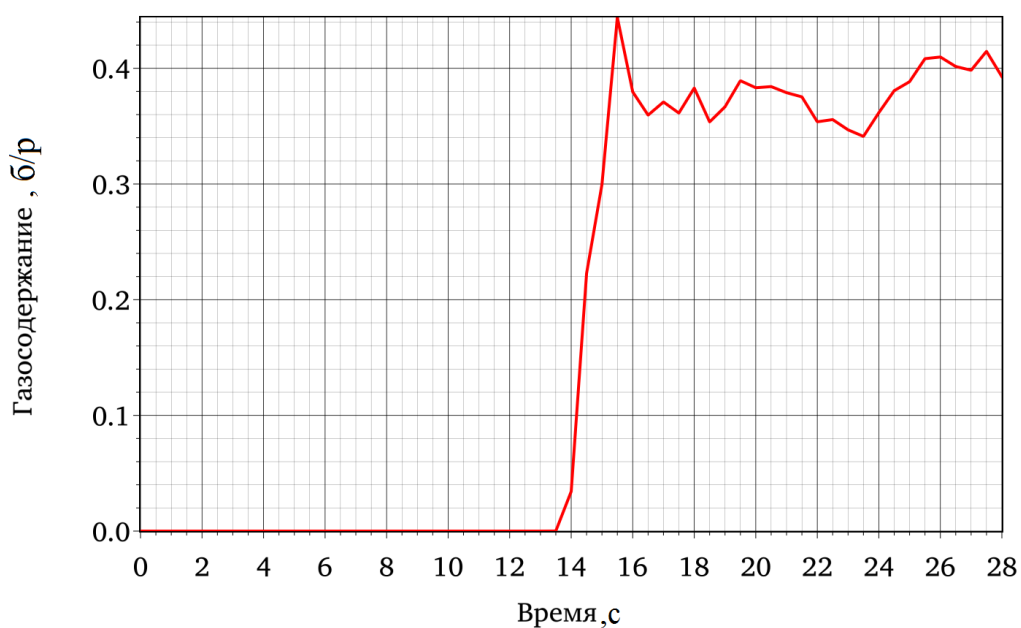


Рисунок 7.44 – Объёмное содержание пара в смеси «свинец–водяной пар» в трубопроводе подачи свинца на входе в аварийный модуль ПГ

При этом газосодержание на входе (рисунок 7.45) и на выходе (рисунок 7.46) а.з. остаётся равным нулю.

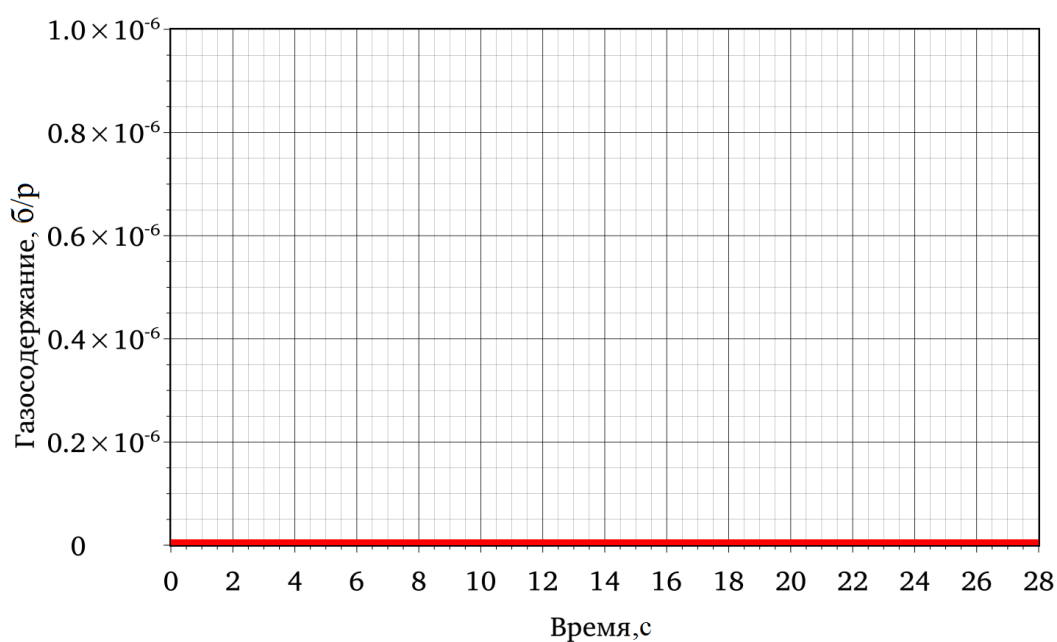


Рисунок 7.45 – Объёмное содержание пара в смеси «свинец–водяной пар» на входе в а.з.

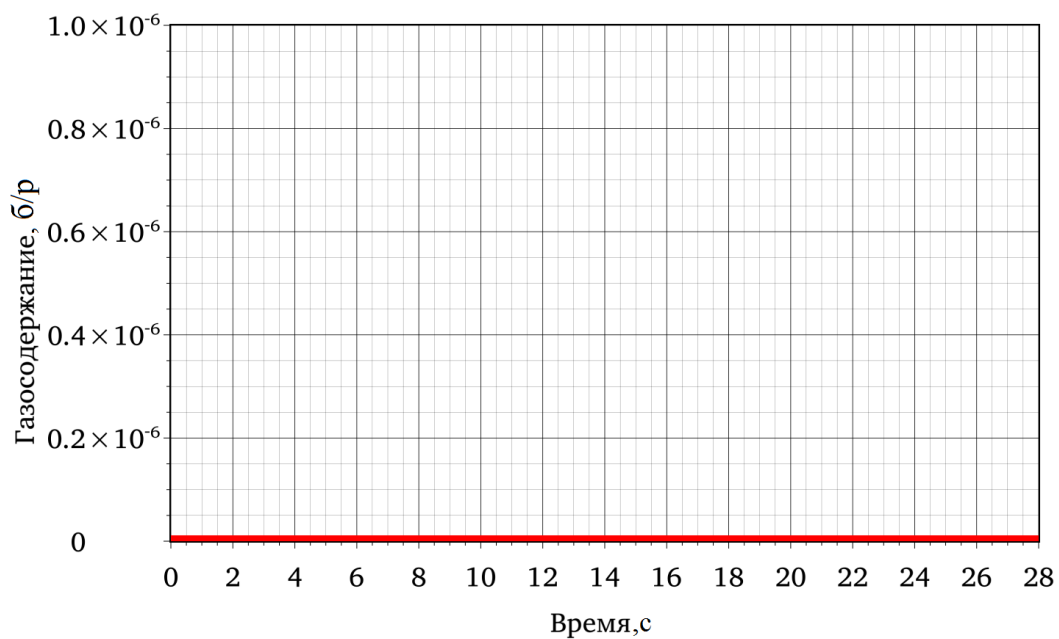


Рисунок 7.46 – Объёмное содержание пара в смеси «свинец–водяной пар» на выходе из а.з.

Выводы по результатам моделирования

Выполнено моделирование режима, вызванного исходным событием «разрыв трубы парогенератора» РУ БРЕСТ-ОД-300 до момента срабатывания органов аварийной защиты. По результатам расчётов получено, что водяной пар поступает в газовую полость реактора, не попадая в а.з., при этом не происходит превышения проектных пределов безопасной эксплуатации РУ.

Следует отметить, что данные расчёты выполнены в предположении постоянства размера паровых пузырей в пределах одной расчётной ячейки.

На основе анализа результатов многовариантных расчётов получено, что неопределённость расчёта температуры свинцового теплоносителя на выходе из а.з. составила $\pm 39^{\circ}\text{C}$, максимальной температуры топлива $\pm 127^{\circ}\text{C}$.

7.3 Моделирование РУ БН-1200

Краткое описание РУ БН-1200

Реактор БН-1200 выполнен в интегральном исполнении, при котором всё основное оборудование первого контура установлено в баке реактора. В состав РУ входят:

- интегральный ядерный реактор на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем;
- второй (промежуточный) натриевый теплопередающий контур;
- третий пароводяной контур (в границах ПГ);
- промежуточный натриевый теплопередающий контур системы аварийного отвода тепла (САОТ);
- воздушный контур САОТ;
- комплекс механизмов внереакторной перегрузки.

Первый контур включает в себя четыре теплообменные петли, которые передают тепло четырём петлям натрия второго контура. В каждую из четырёх петель теплоотвода входит промежуточный теплообменник «натрий–натрий» (ПТО), насос первого контура (ГЦН-1). Исходные данные по конструкциям РУ БН-1200 представлены в [283, 284].

Нодализация схема РУ БН-1200

Описание теплогидравлической модели а.з., основных контуров и системы САОТ РУ БН-1200

Нодализация схема первого контура включает:

- активную зону;

- верхнюю камеру смещения реактора;
- промежуточные теплообменники первого-второго контуров;
- сливную камеру промежуточного теплообменника первого-второго контуров (пространство между средней и верхней плитой опорного пояса);
- главные циркуляционные насосы первого контура;
- напорные трубопроводы ГЦН-1;
- напорную камеру;
- напорные трубопроводы АТО;
- АТО;
- нижнюю камеру реактора (объём ниже средней плиты опорного пояса);
- трассу охлаждения корпуса реактора;
- тепловые экраны;
- газовую систему первого контура;
- холодные фильтр-ловушки;
- центральную поворотную колонну.

Используемая в теплогидравлическом модуле интегрального программного комплекса ЕВКЛИД/V1 канальная модель не позволяет автоматически учитывать изменение структуры течения в верхней камере смещения. Чтобы избавиться от усреднения температуры в камере, например, в режимах с несимметричной работой петель главного циркуляционного контура, камера смещения разбита на несколько отдельных камер по числу петель циркуляции, соединённых между собой с использованием каналов и теплопроводящих структур для учёта теплового и гидродинамического взаимодействия.

В нодализационную схему второго контура входит следующее оборудование: промежуточные теплообменники первого-второго контуров; трубопроводы натрия второго контура; парогенератор; главный циркуляционный насос второго контура. Нодализационная схема ПГ включает в себя элементы, геометрические характеристики которых соответствуют двум модулям парогенератора. В состав нодализационной схемы ПГ со стороны второго контура входят: камеры подвода и отвода теплоносителя, межтрубное пространство, корпус парогенератора. Со стороны третьего контура в нодализационную схему ПГ входят теплообменные трубки и граничные условия по температуре и расходу питательной воды, давлению острого пара.

САОТ состоит из четырёх независимых петель, каждая из которых включает в себя три теплопередающих контура: контур в баке реактора, промежуточный и воздушный контуры. В баке реактора размещён АТО с обратным клапаном. Промежуточный контур соединяет АТО,

расширительный бак и два воздушных теплообменника «натрий–воздух». Циркуляция натрия в промежуточном контуре обеспечивает передачу тепла от натрия первого контура к атмосферному воздуху. В воздушном контуре воздух проходит через воздуховоды, ВТО с шиберами, вытяжную трубу и сбрасывается в атмосферу.

В зависимости от рассматриваемой задачи все теплоотводящие петли РУ и каналы системы САОТ могут моделироваться отдельно, или одна из теплоотводящих петель (каналов САОТ) может соответствовать (по объёмам теплоносителя, поверхностям теплообмена, теплоёмкости оборудования) двум, трём, четырём теплоотводящим петлям (каналам системы САОТ).

Активная зона в интегральном коде ЕВКЛИД/V1 моделируется с помощью инженерного объекта «Core», в котором задаются следующие параметры:

- картограмма ТВС;
- размеры ТВС;
- шаг решетки для ТВС;
- шаг решётки для ТВЭЛОВ;
- разбиение по высоте;
- наличие чехлов и их характеристики.

На рисунке 7.47 представлена нодализационная схема а.з. РУ БН-1200.

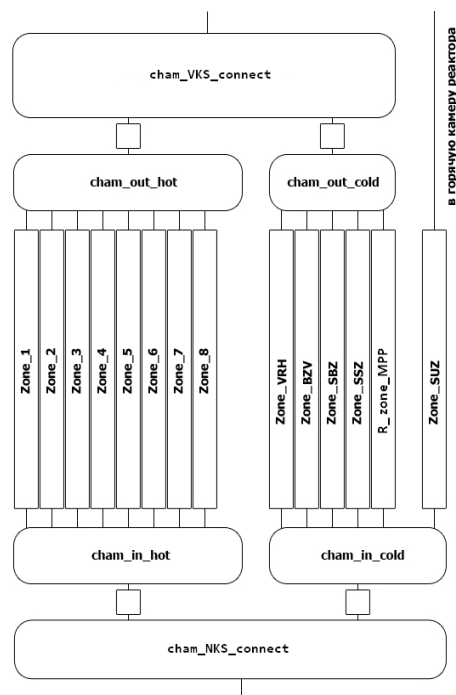


Рисунок 7.47 – Нодализационная схема а.з. РУ БН-1200

Активная зона моделируется 14 каналами. Каналы Zone_1–Zone_4 соответствуют ТВС основного массива. Каналы Zone_5 и Zone_6 соответствуют ТВС предпоследнего ряда. Каналы Zone_7 и Zone_8 соответствуют ТВС последнего ряда активной зоны. Каналы Zone_BZV, Zone_SUZ, Zone_VRH, Zone_SBZ, Zone_SSZ моделируют ТВС БЗВ, СУЗ, ВРХ, СБЗ и ССЗ, соответственно. Канал R_zone_MPP моделирует межчехловое пространство.

В таблице 7.9 приведена кратность каналов, моделирующих каналы активной зоны. Кратность каналов Zone_1–Zone_8, Zone_BZV, Zone_SUZ, Zone_VRH, Zone_SBZ, Zone_SSZ соответствует количеству ТВС в данных каналах. Каналы Zone_1–Zone_8 соответствуют зонам гидравлического профилирования 1А–8А. Картограмма зон гидравлического профилирования РУ БН-1200 приведена на рисунке 7.48.

Таблица 7.9 – Кратность каналов, моделирующих активную зону РУ БН-1200

№, п/п	Имя канала	Тип канала	Кратность	Тип ТВС в канале
1	Zone_1	ТВС а.з. зона ГП 1А	156	ТВС основного массива
2	Zone_2	ТВС а.з. зона ГП 2А	78	
3	Zone_3	ТВС а.з. зона ГП 3А	30	
4	Zone_4	ТВС а.з. зона ГП 4А	18	
5	Zone_5	ТВС а.з. зона ГП 5А	36	ТВС предпоследнего ряда
6	Zone_6	ТВС а.з. зона ГП 6А	30	
7	Zone_7	ТВС а.з. зона ГП 7А	54	ТВС последнего ряда
8	Zone_8	ТВС а.з. зона ГП 8А	30	
9	Zone_BZV	ТВС БЗВ (зоны 1В–4В)	174	Соответствует типу канала
10	Zone_SUZ	Сборки СУЗ	31	
11	Zone_VRH	ТВС ВРХ	198	Соответствует типу канала
12	Zone_SBZ	СБЗ	527	
13	Zone_SSZ	ССЗ	46	
14	R_zone_MPP	Межчехловое пространство	1	–

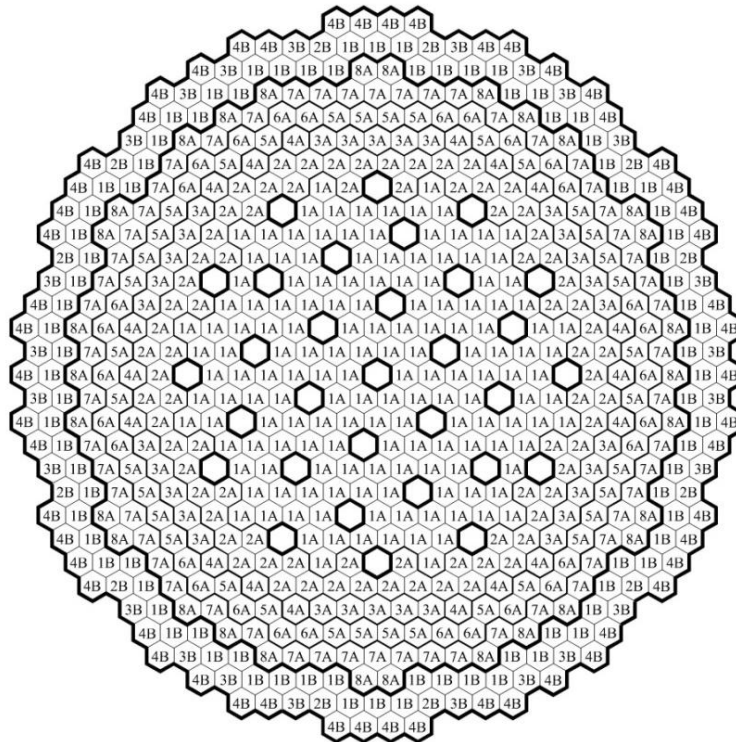


Рисунок 7.48 – Картограмма зон гидравлического профилирования а.з. РУ БН-1200

В теплогидравлических каналах а.з. РУ БН-1200 модулем БЕРКУТ моделируются твэлы и пэлы. Особенностью конструкции а.з. РУ БН-1200 является то, что в верхней части каналов а.з. над пучком твэлов расположена верхняя защита, представляющая собой пучки пэлов с карбидом бора. Во всех твэлах и пэлах в качестве материала оболочки используется сталь ЭК-164 ИД х.д. Газ закачки – гелий.

На рисунке 7.49 представлена нодализация схема первого контура РУ БН-1200.

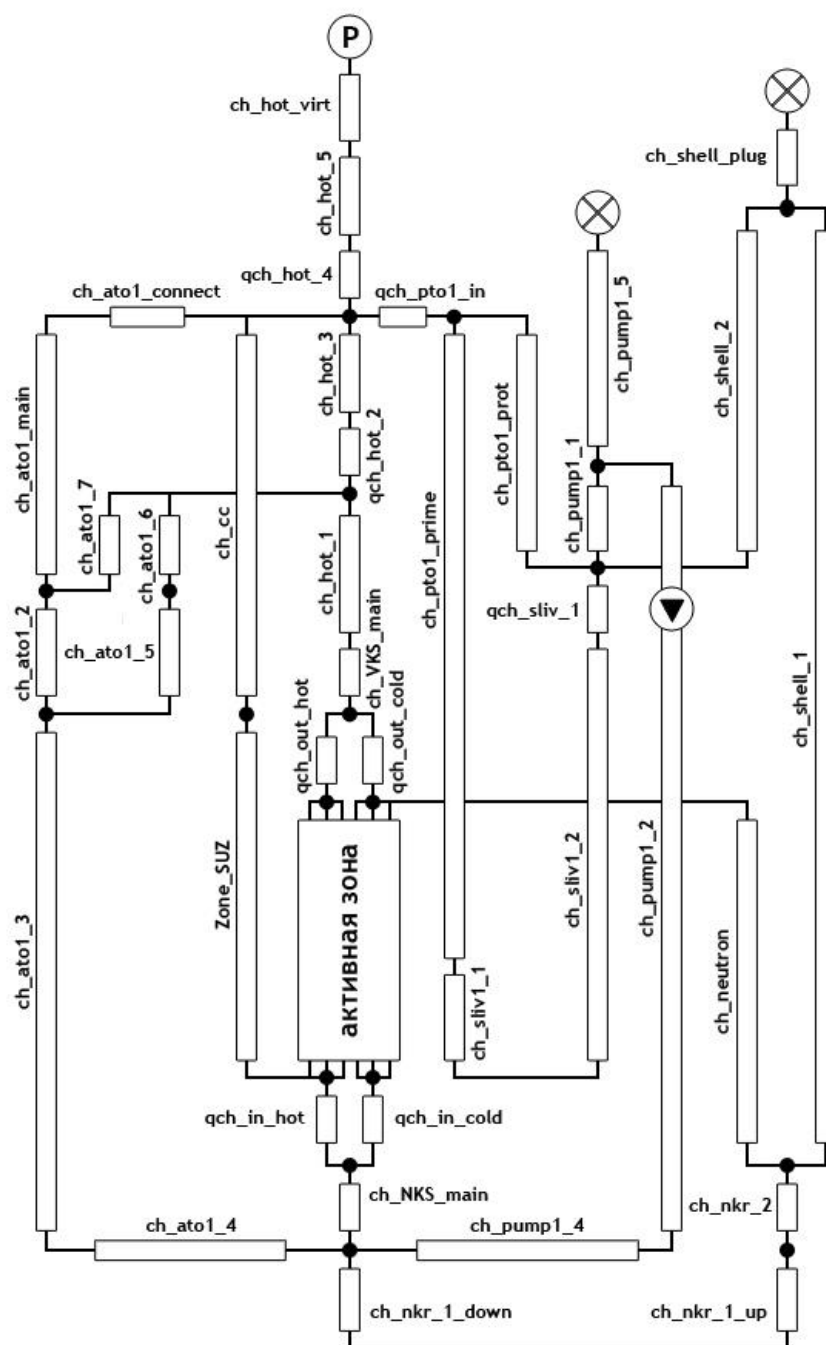


Рисунок 7.49 – Нодализация первого контура РУ БН-1200

Нодализация второго контура (рисунок 7.50) включает в себя 4 идентичные петли, каждая из которых состоит из:

- ПТО;
- ПГ;
- трубопроводов, соединяющих ПТО и ПГ;
- ГЦН-2.

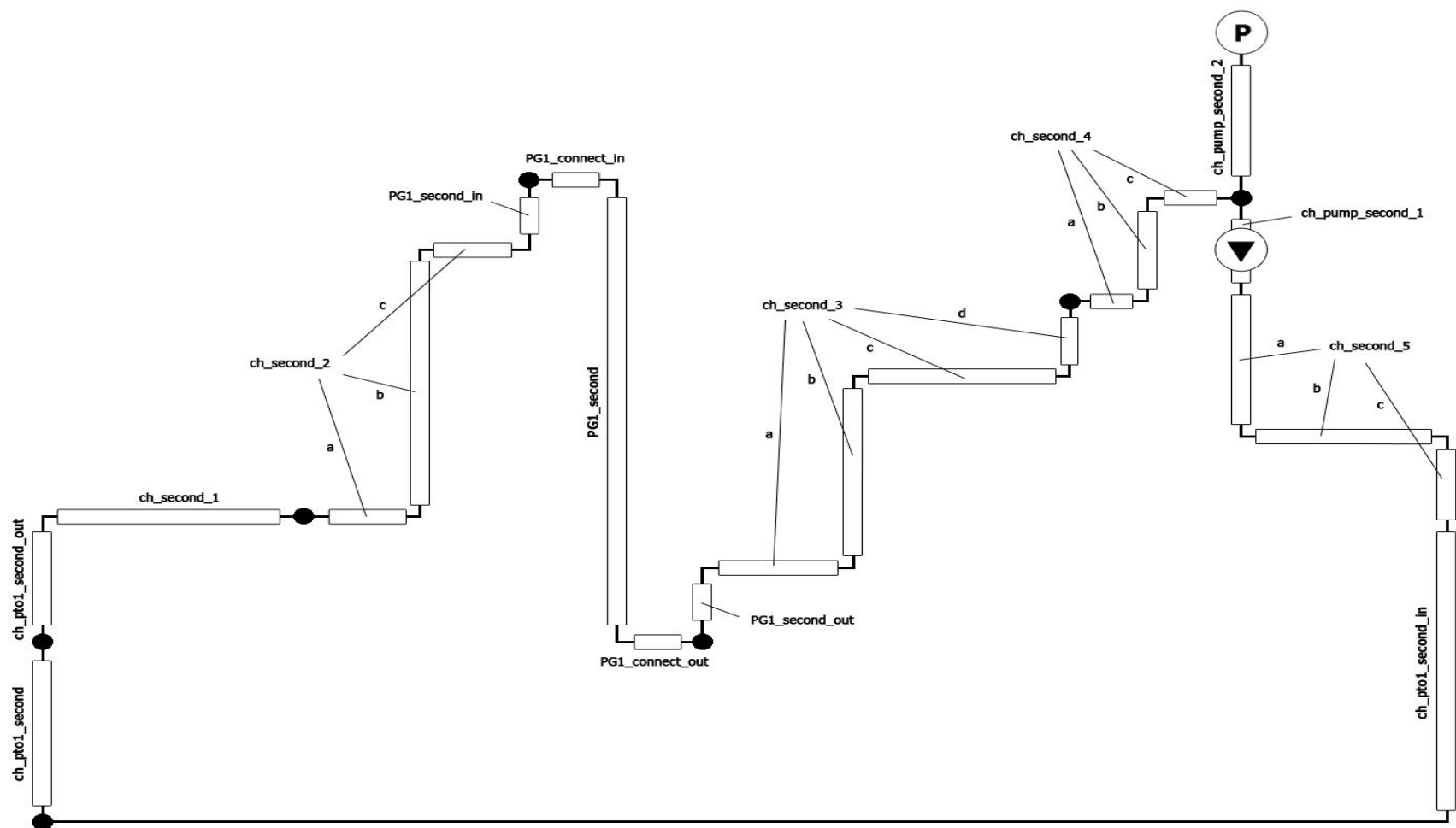


Рисунок 7.50 – Нодализация схема второго контура РУ БН-1200

Третий контур представлен в виде ПГ с граничными условиями по расходу питательной воды на входе и давлению пара на выходе.

В РУ БН-1200 предусмотрена система аварийного отвода тепла, состоящая из четырёх идентичных петель. На рисунках 7.51 и 7.52 представлены нодализационные схемы промежуточного контура САОТ и ВТО для одной из петель.

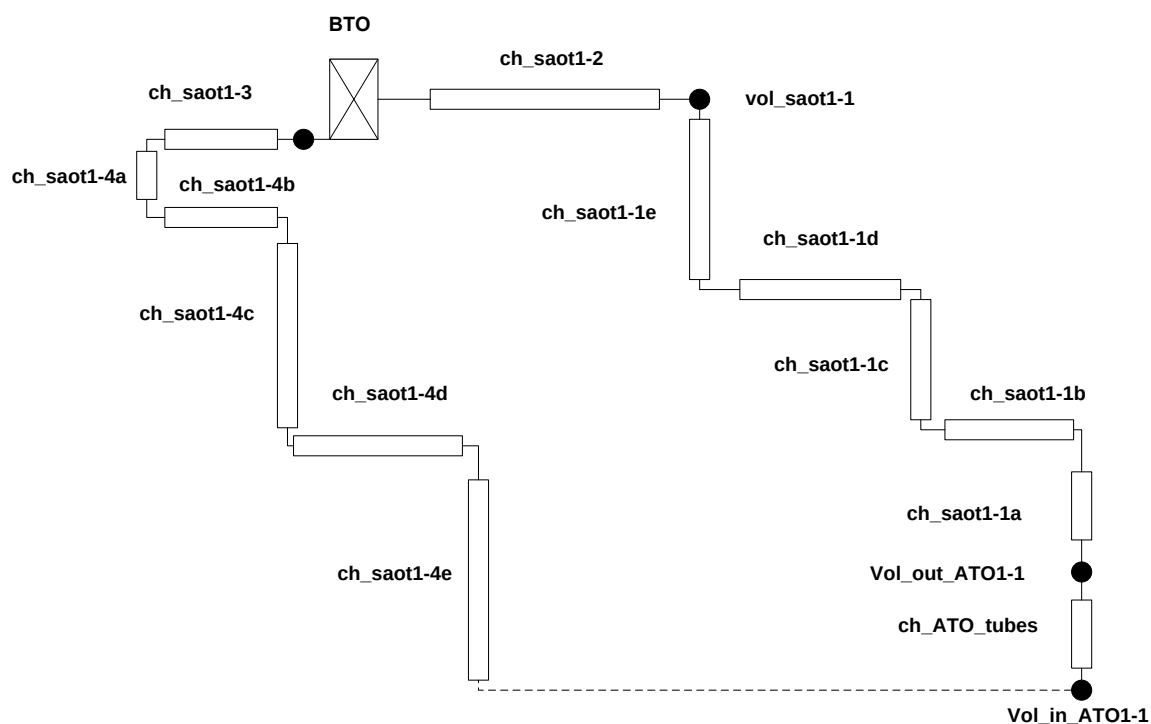


Рисунок 7.51 – Нодализационная схема промежуточного контура САОТ

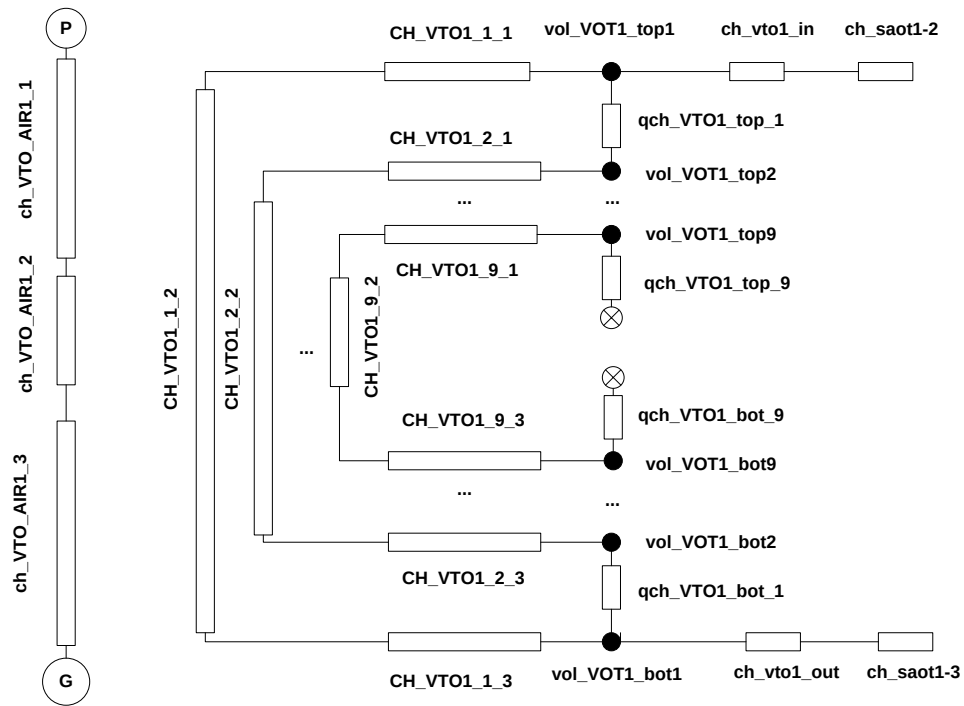


Рисунок 7.52 – Нодализация ВТО

Моделирование переходных и аварийных режимов осуществляется заданием частот вращения ГЦН-1 и ГЦН-2, положения обратных клапанов ГЦН-1 и АТО, расхода, температуры и давления питательной воды на входе в парогенераторы, температуры и расхода воздуха на входе в ВТО.

Теплогидравлическая модель РУ БН-1200, реализованная в коде ЕВКЛИД/V1, позволяет учитывать:

- неравномерность температурного состояния ТВЭЛ по высоте и радиусу активной зоны;
- теплообмен в межпакетном пространстве активной зоны;
- теплопередачу между «горячими» и «холодными» камерами реактора, образованными внутриреакторными конструкциями;
- изменение структуры течения теплоносителя в верхней камере реактора при несимметричной работе теплоотводящих петель;
- развитие естественной циркуляции теплоносителя в замкнутых контурах;
- тепловые потери с корпуса реактора, трубопроводов и оборудования второго контура, системы САОТ.

A circular hexagonal grid with a complex, multi-colored pattern. The colors include shades of gray, orange, teal, pink, brown, green, and blue. The pattern is symmetrical and resembles a stylized, abstract design.

- | | |
|-----------------------------|-----------------------------|
| 1 – ТВС основного массива | 9 – Сборка ПАЗ-Т |
| 2 – ТВС предпоследнего ряда | 10 – Сборка ПАЗ-Г |
| 3 – ТВС последнего ряда | 11 – СБЗ |
| 4 – ТВС БЗВ первого ряда | 12 – СБЗ периферийная |
| 5 – ТВС БЗВ второго ряда | 13 – ССЗ первого исполнения |
| 6 – Сборка регулирующая | 14 – ССЗ второго исполнения |
| 7 – Сборка компенсирующая | 15 – Сборки ВРХ |
| 8 – Сборка АЗ | |

Рисунок 7.53 – Картограмма нейтронно-физической модели активной зоны реактора БН-1200 в коде ЕВКЛИД/V1

Таблица 7.10 – Высотное разбиение нейтронно-физической модели активной зоны РУ БН-1200 в коде ЕВКЛИД/V1

№	dH, см	Тип ТВС													
		ТВС а.з.	ТВС БЗВ	ТВС ВРХ	ТВС СБЗ	ТВС ССЗ									
		1–3	4–5	15	11–12	13–14									
51	15,0	Головка	Головка	Головка	Головка	Головка									
50	16,9														
49	20,0														
48	10,027	Верхний поглощающий экран	Верхний поглощающий экран	Верхний поглощающий экран	В ₄ С	Сталь									
47	8,774														
46	8,774														
45	8,774														
44	8,774														
43	8,022														
42	8,022														
41	4,011														
40	3,530	Натриевая полость	Натриевая полость	Натриевая полость											
39	7,866		Концевики твэл												
38	8,168		БЗВ				Концевики твэл								
37	8,168			Топливная часть ТВС											
36	8,168							НТЗВ							
35	2,925						Газовая полость								
34	7,362	Газовая полость													
33	5,066								Газовая полость						
32	7,599									Газовая полость					
31	7,599										Газовая полость				
30	7,599											Газовая полость			
29	7,599												Газовая полость		
28	7,605													Газовая полость	
27	7,605														Газовая полость
26	7,599														
25	5,066		Газовая полость												
24	5,066			Газовая полость											
23	5,066							Газовая полость							
22	7,599						Газовая полость								
21	5,066	Газовая полость													
20	7,042								Газовая полость						
19	6,640									Газовая полость					
18	6,640										Газовая полость				
17	6,640											Газовая полость			
16	6,640												Газовая полость		
15	6,640													Газовая полость	
14	5,528														Газовая полость
13	11,056														
12	11,056		Газовая полость												
11	11,056			Газовая полость											
10	11,056							Газовая полость							
9	11,056						Газовая полость								
8	11,935	Газовая полость													
7	11,935								Газовая полость						
6	11,935				Газовая полость										
5	11,935					Газовая полость									
4	20,0									Газовая полость					
3	20,0										Газовая полость				
2	20,0											Газовая полость			
1	14,3												Газовая полость		

Квалификация теплогидравлической нодализационной схемы

Проверка точности воспроизведения геометрии РУ БН-1200

Список параметров, выбранных для рассмотрения, представлен в таблице 7.11 ниже. Отклонение E значений расчётной модели от проектных величин определяется по формуле (7.1).

Из таблицы 7.11 видно, что, в целом, расчётная модель достаточно точно описывает параметры моделируемой реакторной установки.

Таблица 7.11 – Сравнение проектных и расчётных характеристик РУ БН-1200 по геометрии

Параметр	E , %
Объём натрия	
Объём натрия в горячей камере реактора	0
Объём натрия между опорой и профилирующей обечайкой ПТО	0
Объём натрия в ПТО первого контура	0
Объём натрия в сливной камере ПТО	11
Объём натрия в верхней камере смешения	4
Объём натрия в АТО	12
Объём натрия в напорном трубопроводе и в баке ГЦН-1	3
Объём натрия охлаждения нейтронной подпорки	<1
Объём натрия в системе охлаждения корпуса реактора	2
Объём натрия в ПТО, ПГ, ГЦН-2, трубопроводов ПТО-ПГ и ПГ-ГЦН-2 второго контура	<1
Проходные сечения	
Проходное сечение в наружной полости АТО	
минимальное	0
максимальное	0
Проходное сечение во внутренней полости АТО	
минимальное	0
максимальное	0
Проходное сечение в наружной полости ПТО	
минимальное	0
максимальное	0
Проходное сечение во внутренней полости ПТО	
минимальное	0
максимальное	0

Продолжение таблицы 7.11

Параметр	Е, %
Проходное сечение в наружной полости ПГ	
минимальное	0
максимальное	0
Проходное сечение во внутренней полости ПГ	
минимальное	0
максимальное	0
Проходное сечение участка течения ГЦН первого контура	
минимальное	0
максимальное	0
Проходное сечение участка течения ГЦН второго контура	
минимальное	0
максимальное	0
Проходное сечение участка течения через сборку твэл в ТВС	
минимальное	<1
максимальное	<1
Проходное сечение участка течения через сборку пэл в ТВС	
минимальное	0
максимальное	0
Проходное сечение участка течения через сборку в СБЗ	
минимальное	0
максимальное	0
Проходное сечение участка течения через сборку твэл в БЗВ	
минимальное	<1
максимальное	<1
Проходное сечение участка течения через сборку пэл в БЗВ	
минимальное	0
максимальное	0
Проходное сечение участка течения через сборку в ССЗ	
минимальное	0
максимальное	0
Диаметры	
Диаметр твэл	0
Диаметр пэл	0
Диаметр стержней СУЗ	0
Диаметр стержней СБЗ	0
Диаметр стержней БЗВ	0
Диаметр стержней ССЗ	0
Диаметр трубки ПТО	0
Диаметр трубки ПГ	0
Диаметр трубки АТО	0

Квалификация стационарного режима работы РУ БН-1200

Результаты расчётов по коду ЕВКЛИД/V1 основных теплогидравлических параметров РУ в номинальном режиме и их сравнение с проектными данными приводятся в таблице 7.12.

Таблица 7.12 – Основные теплогидравлические параметры РУ в номинальном режиме

Наименование параметра	Значение		ε_{np}
	ЕВКЛИД/V1	Проект [283]	(δ_{np}), %
Первый контур			
Расход теплоносителя первого контура через ТВС активной зоны, т/с	15,7	15,7	0,3
Расход теплоносителя первого контура через ПТО, т/с	3,9	3,9	0,2
Температура натрия на выходе из ТВС а.з., °С	568	564	3
Температура теплоносителя первого контура на входе в ПТО, °С	553	550	2
Температура теплоносителя первого контура на выходе из ПТО, °С	412	410	1,4
Второй контур			
Расход теплоносителя второго контура, т/с	3,2	3,2	0
Температура теплоносителя второго контура на входе в ПГ, °С	530	527	1,7
Температура теплоносителя второго контура на выходе из ПГ, °С	357	355	1,2
Третий контур			
Расход питательной воды, кг/с	336	335	0,3
Температура пара на выходе из ПГ, °С	509	510	0,4

Отклонение по расходам δ_{np} определяется по формуле:

$$\delta_{np} = \frac{|G_P - G_{II}|}{G_{II}} \cdot 100\%, \quad (7.2)$$

где G_p – рассчитанное по коду ЕВКЛИД/V1 значение расхода теплоносителя, кг/с; G_{II} – проектное значение расхода теплоносителя, кг/с.

Отклонение по температурам ε_{np} определяется по формуле:

$$\varepsilon_{np} = \frac{|T_p - T_{II}|}{\Delta T_{I/II/III}} \cdot 100\%, \quad (7.3)$$

где T_p – рассчитанное по коду ЕВКЛИД/V1 значение температуры теплоносителя, °С; T_{II} – проектное значение температуры теплоносителя, °С; $\Delta T_{I/II/III}$ – проектное значение температурного напора по теплоносителю первого/второго/третьего контуров, °С.

Из таблицы 7.12 видно, что результаты расчётов по коду ЕВКЛИД/V1 основных теплогидравлических параметров РУ БН-1200 в номинальном режиме удовлетворительно согласуются с проектными данными.

Стационарный режим работы РУ БН-1200 на номинальном уровне мощности

Исключение вычислительных неопределённостей

С целью обоснования расчётной модели РУ БН-1200 проведён анализ сходимости результатов расчётов по аксиальной сетке в а.з. Выполнена серия расчётов с увеличенным количеством расчётных ячеек в активной части а.з. в 2 и 4 раза относительно базового варианта, результаты моделирования которого представлены в таблице 7.12. Полученные результаты приведены в таблице 7.13. Для всех расчётов по формулам (7.2) и (7.3) вычислены отклонения относительно проектных данных. Из представленных данных видно, что сгущение аксиальной сетки в два раза приводит к бóльшим отклонениям от проектных данных, чем в базовом варианте, что вызвано сглаживанием максимума энерговыделения около центральной плоскости а.з. в случае чётного количества расчётных слоёв. Результаты базового расчёта и расчёта с аксиальной сеткой, измельчённой в 4 раза, достаточно хорошо согласуются с номинальными параметрами РУ и между собой, что демонстрирует сходимость результатов относительно выбора пространственной сетки.

Таблица 7.13 – Основные теплогидравлические параметры РУ БН-1200 в номинальном режиме.
Сходимость по сетке

Наименование параметра	ЕВКЛИД/V1			Проект	$\varepsilon_{np}(\delta_{np}),\%$		
	N	2N	4N		N	2N	4N
Первый контур							
Расход теплоносителя первого контура через ТВС активной зоны, т/с	15,7	15,7	15,7	15,7	0,3	0,2	0,1
Расход теплоносителя первого контура через ПТО, т/с	3,9	3,9	3,9	3,9	0,2	0,3	0,4
Температура теплоносителя первого контура на входе в ПТО, °С	553	544	547	550	2	4	2
Температура теплоносителя первого контура на выходе из ПТО, °С	412	405	407	410	1,4	4	2
Второй контур							
Расход теплоносителя второго контура, т/с	3,2	3,2	3,2	3,2	0	0,1	0,06
Температура теплоносителя второго контура на входе в ПГ, °С	530	522	524	527	1,7	3	1,7
Температура теплоносителя второго контура на выходе из ПГ, °С	357	352	354	355	1,2	1,7	0,6
Третий контур							
Расход питательной воды, кг/с	336	336	336	335	0,3	0,3	0,3
Температура пара на выходе из ПГ, °С	509	505	507	510	0,4	2	1,3

Поскольку при выполнении расчётов кодом ЕВКЛИД/V1 стационарное распределение параметров определяется методом «установления», то проведён анализ сходимости результатов расчётов стационарного состояния РУ БН-1200 по максимальному шагу интегрирования по времени. Выполнена серия расчётов с максимальными временными шагами 5×10^{-3} , 10^{-3} и 10^{-4} с. Полученные результаты приведены в таблице 7.14. Для всех расчётов по формулам (7.2) и (7.3)

вычислены отклонения относительно проектных данных. Из представленных данных видно, что изменение максимального временного шага не влияет на результаты расчёта.

Таблица 7.14 – Основные теплогидравлические параметры РУ БН-1200 в номинальном режиме.

Сходимость по шагу по времени

Наименование параметра	ЕВКЛИД/V1			Проект	$\varepsilon_{np}(\delta_{np}), \%$		
	$5 \times 10^{-3} \text{с}$	10^{-3}с	10^{-4}с		$5 \times 10^{-3} \text{с}$	10^{-3}с	10^{-4}с
Первый контур							
Расход теплоносителя первого контура через ТВС активной зоны, т/с	15,7	15,7	15,7	15,7	0,3	0,3	0,3
Расход теплоносителя первого контура через ПТО, т/с	3,9	3,9	3,9	3,9	0,2	0,2	0,2
Температура теплоносителя первого контура на входе в ПТО, °С	553	553	553	550	2	2	2
Температура теплоносителя первого контура на выходе из ПТО, °С	412	412	412	410	1,4	1,4	1,4
Второй контур							
Расход теплоносителя второго контура, т/с	3,2	3,2	3,2	3,2	0	0	0
Температура теплоносителя второго контура на входе в ПГ, °С	530	530	530	527	1,7	1,7	1,7
Температура теплоносителя второго контура на выходе из ПГ, °С	357	357	357	355	1,2	1,2	1,2
Третий контур							
Расход питательной воды, кг/с	336	336	336	335	0,3	0,3	0,3
Температура пара на выходе из ПГ, °С	509	509	509	510	0,4	0,4	0,4

Результаты моделирования

На основе обобщения результатов анализа чувствительности, выполненного в ходе верификационных расчётов, были выбраны параметры для проведения многовариантных расчётов, представленные в таблице 7.15.

Таблица 7.15 – Параметры для проведения многовариантных расчётов стационарного режима работы РУ БН-1200 на номинальном уровне мощности

Параметр варьирования	Значение
Коэффициент локального сопротивления, %	± 10
Коэффициент теплоотдачи для ПТО и ПГ, %	± 20
Обороты ГЦН первого и второго контура, %	$\pm 0,5$
Расход питательной воды, %	± 5
Температура питательной воды, К	± 5
Полная мощность, %	± 10
Диаметр твэлов, %	± 3

Полученные результаты моделирования приведены в таблице 7.16.

Таблица 7.16 – Основные теплогидравлические параметры РУ БН-1200

Наименование параметра	Среднее значение	Минимальное значение	Максимальное значение	Неопределённость
Первый контур				
Температура натрия на выходе из ТВС а.з., °С	555	542	569	± 14
Температура теплоносителя первого контура на входе в ПТО, °С	553	539	566	± 14
Температура теплоносителя первого контура на выходе из ПТО, °С	412	395	423	± 14

Продолжение таблицы 7.16

Наименование параметра	Среднее значение	Минимальное значение	Максимальное значение	Неопределённость
Второй контур				
Температура теплоносителя второго контура на входе в ПГ, °С	530	519	544	±13
Температура теплоносителя второго контура на выходе из ПГ, °С	357	345	368	±12
Третий контур				
Температура пара на выходе из ПГ, °С	509	490	530	±20

В результате анализа чувствительности получено, что наибольшее влияние на температуру теплоносителя на входе и выходе из активной зоны, входе и выходе ПТО оказывает варьирование значений коэффициента теплоотдачи в ПТО и ПГ и расхода питательной воды. На температуру теплоносителя второго контура на выходе из ПГ и температуру пара на выходе из ПГ наиболее сильное влияние оказывает изменение расхода питательной воды.

Выводы по результатам моделирования

Проведено моделирование стационарного режима работы РУ БН-1200 на номинальном уровне мощности. Выполнена квалификация разработанной нодализационной схемы. Показано, что разработанная и построенная средствами интегрального программного комплекса ЕВКЛИД/V1 расчётная модель хорошо описывает основные параметры моделируемого объекта. Определены параметры для выполнения многовариантных расчётов. Перечень параметров составлен на основе экспертных оценок и результатов анализа чувствительности. Определены неопределённости расчёта температур теплоносителя, не превысившие 40°С.

Моделирование начальной стадии аварии с потерей системного и надёжного электроснабжения с отказом всех средств воздействия на реактивность

Описание режима

В качестве исходного состояния при анализе аварии рассматривается работа энергоблока на четырёх теплоотводящих петлях. Анализ аварии проводился для загрузки активной зоны смешанным оксидным уран-плутониевым топливом. В качестве исходного события принимается потеря системного и надёжного электроснабжения на станции. Исходное событие приводит к потере функционирования систем и потребителей нормального и надёжного электроснабжения.

Функционирование систем и оборудования РУ после исходного события:

- ГЦН-1 и ГЦН-2 отключаются. Обороты насосов снижаются в соответствии с кривой естественного механического выбега;
- расход питательной воды в парогенераторах прекращается за 15 с.

Постулируется отказ УСБ АЗ, соответственно отсутствует сброс РО АЗ, перемещение вниз РО КС и РО РС, автоматический ввод в работу САОТ. Постулируется также отказ всех пассивных систем остановки реактора. При снижении расхода теплоносителя менее ~ 10 % от номинального значения шаровые клапаны, расположенные в нижней части АТО, опускаются вниз (под действием собственного веса) и освобождают тракт циркуляции натрия «АТО–напорная камера–активная зона». Моделирование проводится для первых 20 секунд процесса.

Исключение вычислительных неопределённостей

Для исключения вычислительных неопределённостей были выполнены серии расчётов с уменьшенными значениями шагов по времени и детализацией расчётной сетки, аналогичные проведённым для стационарного режима работы. На рисунках 7.54–7.59 показаны полученные значения максимальной температуры топлива, оболочки твэла и теплоносителя на входе в а.з. Видно, что расчёты можно проводить на базовой расчётной сетке. При этом расчётный шаг при моделировании процесса кипения натриевого теплоносителя уменьшается динамически расчётным кодом до необходимого значения.

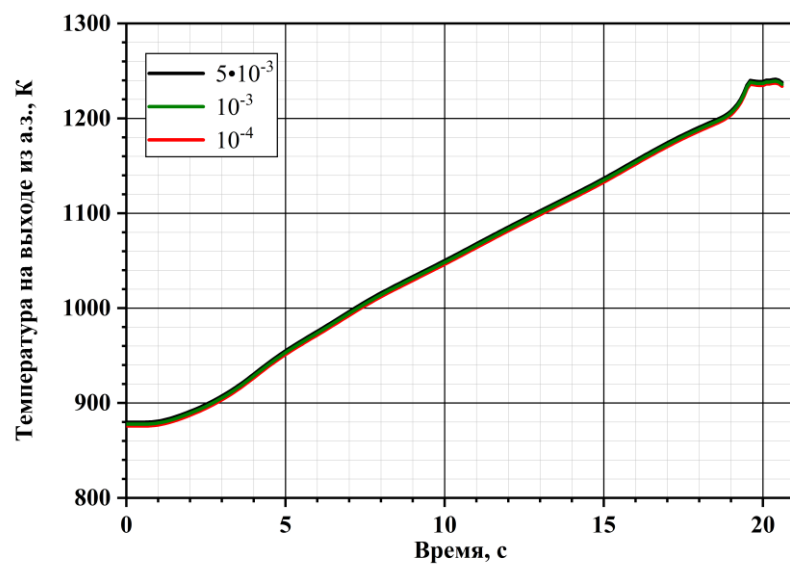


Рисунок 7.54 – Изменение температуры теплоносителя на выходе из а.з. для различных значений шага по времени

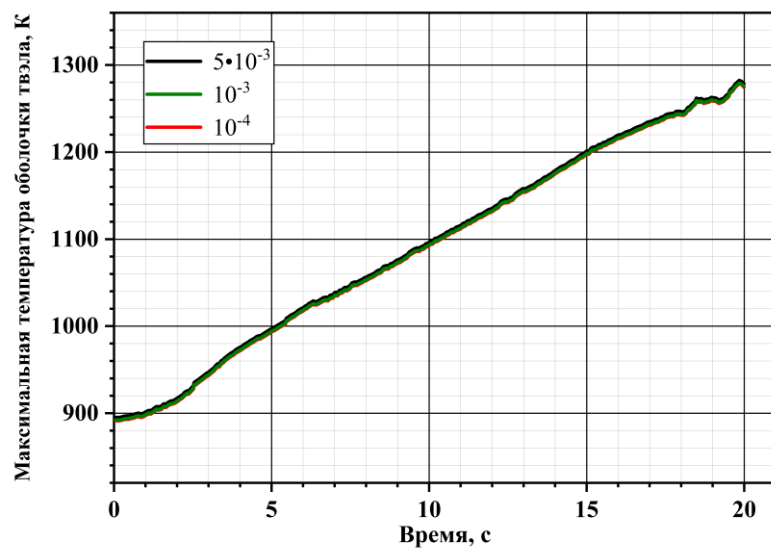


Рисунок 7.55 – Изменение температуры оболочки твэла для различных значений шага по времени

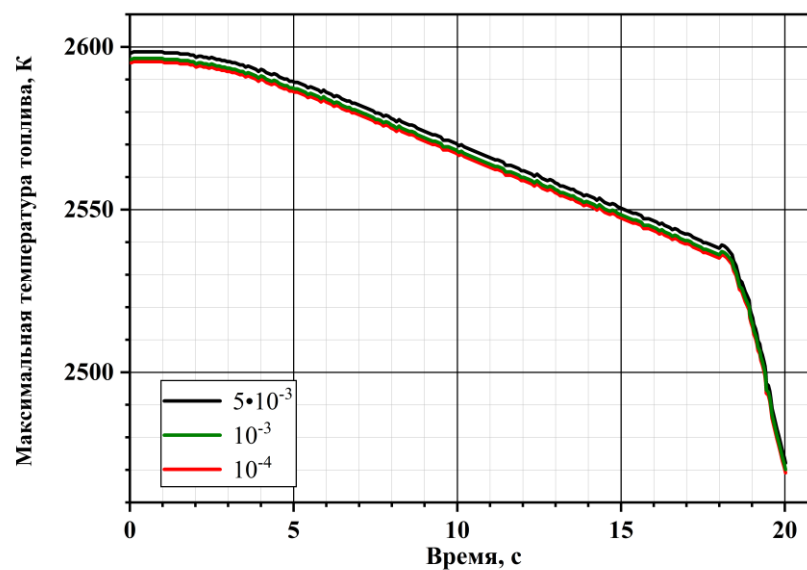


Рисунок 7.56 – Изменение температуры топлива для различных значений шага по времени

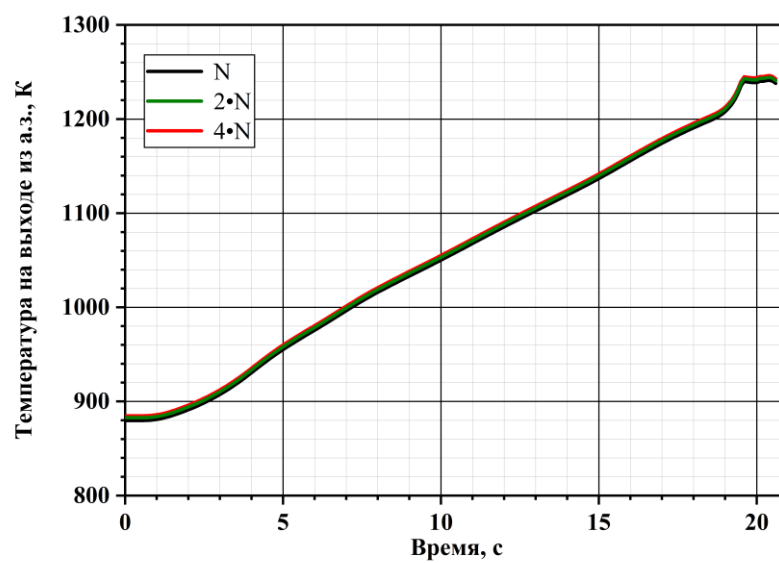


Рисунок 7.57 – Изменение температуры теплоносителя на выходе из а.з. для различных аксиальных сеток

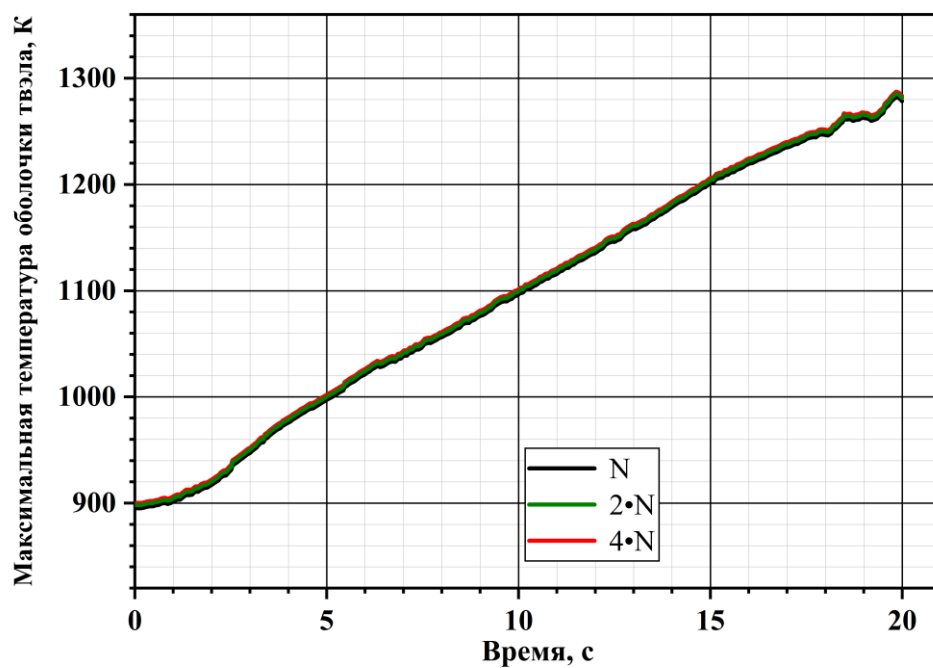


Рисунок 7.58 – Изменение температуры оболочки твэла для различных аксиальных сеток

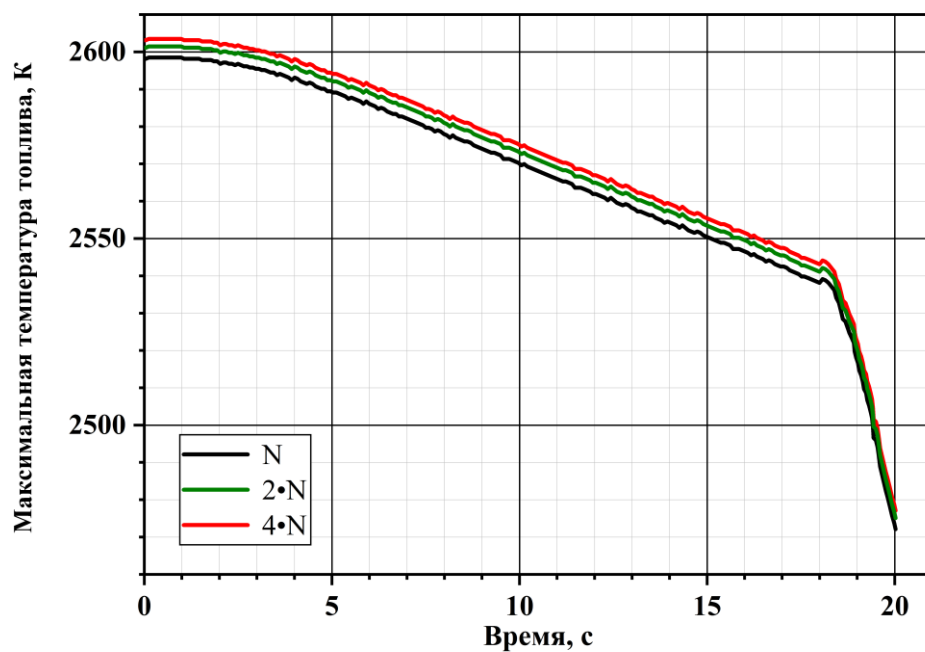


Рисунок 7.59 – Изменение температуры топлива для различных аксиальных сеток

Результаты моделирования

Для оценки неопределённостей была выполнена серия многовариантных расчётов с варьированием параметров, приведённых в таблице 7.17.

Таблица 7.17 – Перечень параметров, которые варьировались при выполнении расчётов

Параметр	Диапазон варьирования
Локальные сопротивления, %	± 10
Коэффициент теплоотдачи, %	± 20
Обороты насоса, %	$\pm 0,5$
Расход питательной воды, %	± 5
Температура питательной воды, К	± 5
Мощность реактора, %	± 10
Внешний радиус твэла, %	± 3
Коэффициент трения со стенкой (однофазный режим), %	± 30
Коэффициент трения со стенкой (двухфазный режим), %	± 34
Коэффициент теплообмена со стенкой, %	± 20

На рисунке 7.60 представлена зависимость мощности реактора от времени. Видно, что начиная с 17 с происходит резкое падение мощности, что связано со вскипанием теплоносителя и вводом отрицательной реактивности из-за пустотного эффекта.

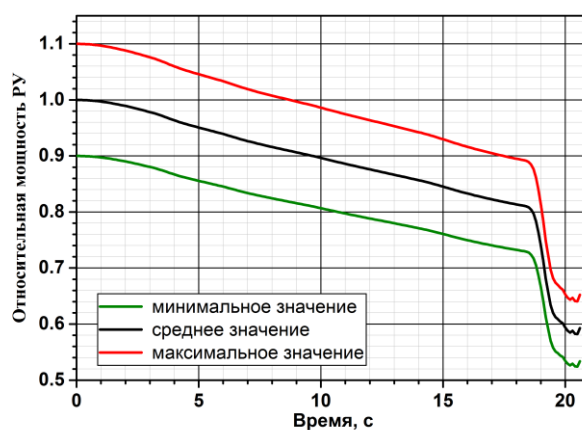


Рисунок 7.60 – Изменение относительной мощности реактора во времени

Температура теплоносителя в активной зоне приведена на рисунке 7.61. За рассматриваемое время расход теплоносителя первого контура падает примерно на 80 %, в то время как мощность на величину не более 40 %, что приводит к нагреву теплоносителя на выходе из а.з.

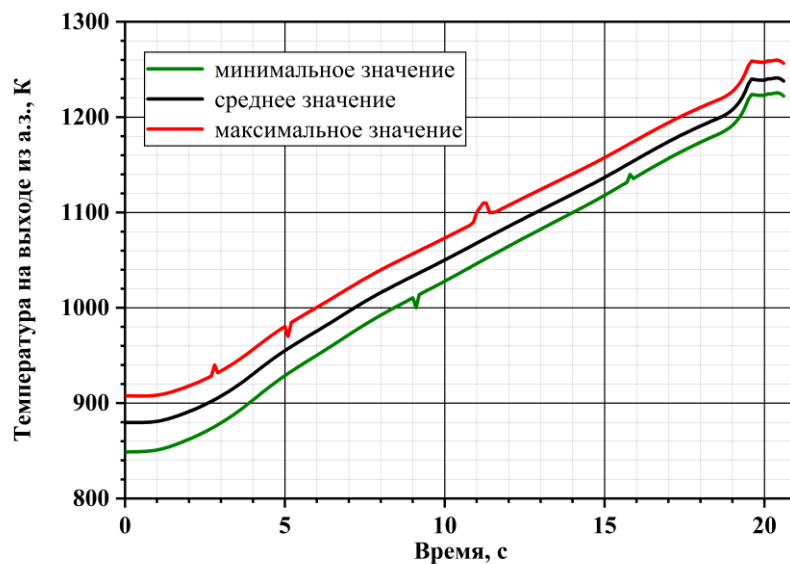


Рисунок 7.61 – Изменение температуры теплоносителя на выходе из а.з.

Начинает нагреваться оболочка твэла (рисунок 7.62), в то время как температура топлива падает из-за снижения мощности (рисунок 7.63).

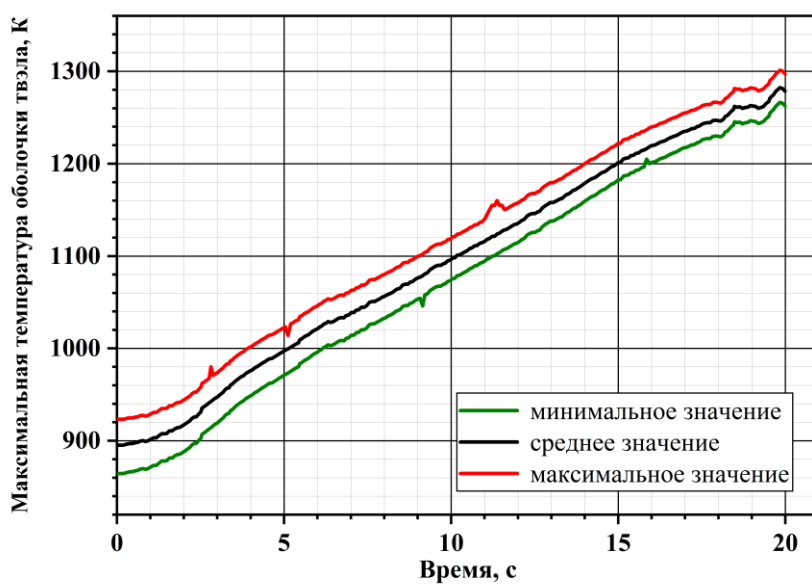


Рисунок 7.62 – Изменение температуры оболочки твэла во времени

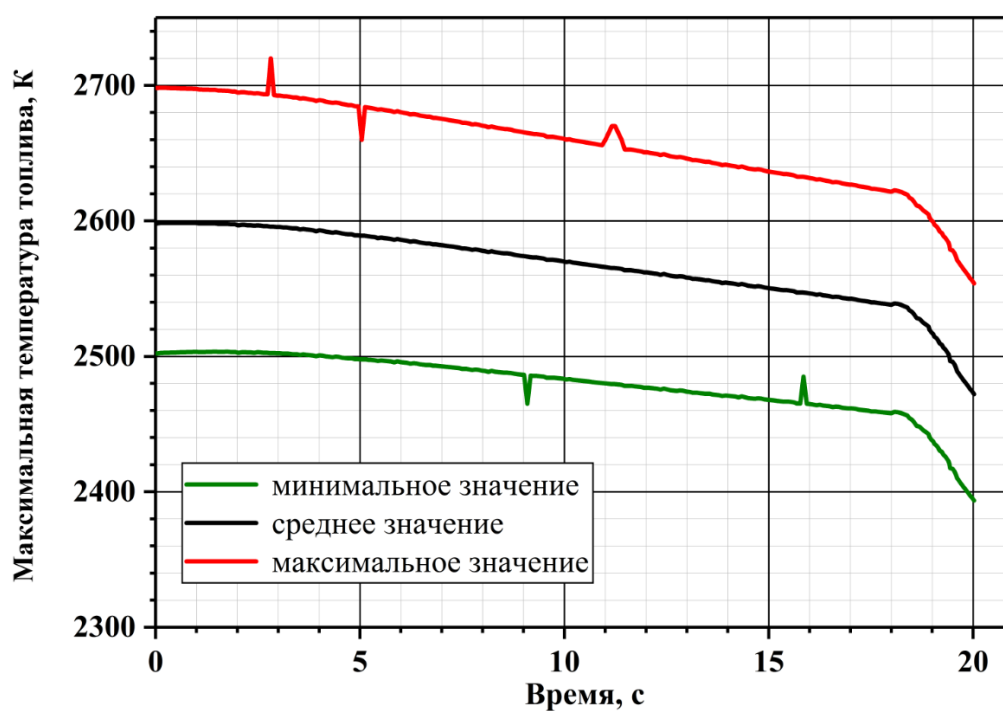


Рисунок 7.63 – Изменение температуры топлива во времени

Теплоноситель вскипает в районе 17 секунды. Объем пара в а.з. показан на рисунке 7.64.

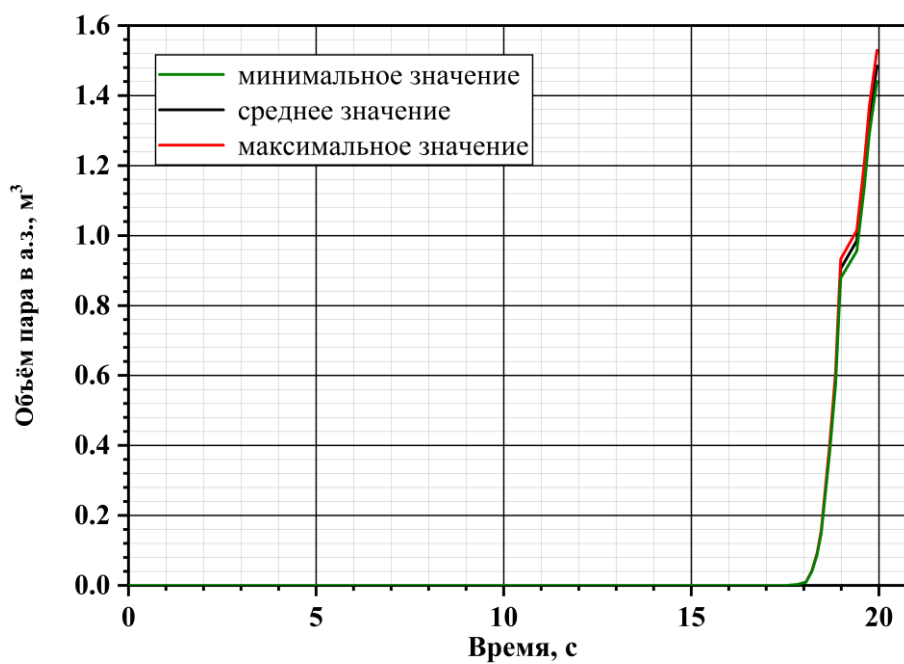


Рисунок 7.64 – Объем пара в а.з.

Выводы по результатам моделирования

Выполнено моделирование начальной стадии аварии с потерей электроснабжения и отказом средств воздействия на реактивность. Получены следующие результаты: теплоноситель вскипает в момент времени около 17 с, что приводит к появлению пара в а.з. и падению мощности реакторной установки. Температура оболочки твэла растёт до 1280 К за 20 с, в то время как температура топлива уменьшается на 120 градусов от номинального значения. Неопределённость расчёта температуры теплоносителя составила ± 21 К, температуры оболочки твэла ± 22 К, максимальной температуры топлива ± 97 К.

7.4 Заключительные и обобщающие замечания по разделу 7

С использованием возможностей, предоставляемых интегральным программным комплексом ЕВКЛИД/V1, разработаны нодализационные схемы РУ БРЕСТ-ОД-300 и БН-1200. Для проверки качества расчётных моделей выполнена их квалификация путём сравнения основных геометрических параметров в номинальном режиме работы реакторных установок с проектными данными. Показано, что разработанные нодализационные схемы позволяют получить хорошее согласие с проектными данными.

Выполнено моделирование следующих режимов работы РУ БРЕСТ-ОД-300:

- стационарного режима работы на номинальном уровне мощности;
- ввода полного запаса положительной реактивности путём извлечения из активной зоны всех РО СУЗ с максимальной проектной скоростью при работе РУ на номинальной мощности со срабатыванием защиты ГЦНА;
- режима, вызванного исходным событием «разрыв трубки парогенератора», до момента срабатывания а.з.

Для каждого из режимов на основе результатов анализа чувствительности, выполненного в ходе верификационных расчётов, и экспертных оценок определены параметры для выполнения многовариантных расчётов, рассчитаны неопределённости основных параметров реакторной установки, составившие для:

- стационарного режима работы на номинальном уровне мощности: максимальная температура топлива ± 93 °С, температура свинцового теплоносителя на выходе из а.з. ± 23 °С, максимальная температура оболочки твэла ± 30 °С;
- ввода полного запаса положительной реактивности: максимальная температура топлива ± 94 °С, температура свинцового теплоносителя на выходе из а.з. ± 39 °С, максимальная температура оболочки твэла ± 46 °С;

– режима, вызванного исходным событием «разрыв трубки парогенератора»: температура свинцового теплоносителя на выходе из а.з. $\pm 39^{\circ}\text{C}$, максимальная температура топлива $\pm 127^{\circ}\text{C}$.

В результате моделирования режима нарушения нормальной эксплуатации РУ БРЕСТ-ОД-300 с вводом полного запаса положительной реактивности получено, что максимальная температура оболочки твэла не превысила температуру плавления с учётом погрешностей расчёта значения температуры.

В результате моделирования режима, вызванного исходным событием «разрыв трубки парогенератора», показано, что водяной пар не попадает в активную зону. При этом необходимо отметить, что расчёты выполнены с использованием базовой модели интегрального программного комплекса ЕВКЛИД/V1 в предположении постоянства размера парового пузыря в пределах одной расчётной ячейки.

Приведены результаты моделирования стационарного режима работы РУ БН-1200 на номинальном уровне мощности. Определены неопределённости расчёта основных параметров реакторной установки, не превысившие по температуре теплоносителя для стационарного режима 40°C .

По результатам моделирования начальной стадии аварии с потерей электроснабжения и отказом средств воздействия на реактивность получены следующие результаты: теплоноситель вскипает в момент времени около 17 с, что приводит к появлению пара в а.з. и падению мощности реакторной установки. Температура оболочки твэла растёт до 1280 К за 20 с, в то время как температура топлива уменьшается на 120 градусов от номинального значения. Неопределённость расчёта температуры теплоносителя составила ± 21 К, температуры оболочки твэла ± 22 К, максимальной температуры топлива ± 97 К.

Таким образом, разработанные научно-методические подходы и созданный на их основе интегральный программный комплекс позволили существенно уменьшить степень эмпиризма расчётного обоснования безопасности и выполнить согласованное моделирование процессов, протекающих в реакторных установках БРЕСТ-ОД-300 и БН-1200 при нормальной эксплуатации и нарушениях нормальной эксплуатации, с оценкой параметров твэла. На современном методическом уровне выполнена оценка неопределённостей расчётных параметров, таких как максимальная температура топлива и оболочки твэла, температура теплоносителя. Для РУ БРЕСТ-ОД-300 впервые с использованием российского верифицированного расчётного кода выполнено моделирование режима, вызванного гильотинным разрывом трубки парогенератора.

Заключение

В результате выполненных исследований:

– Определены теплогидравлические и нейтронно-физические процессы и явления, которые должны моделироваться для корректного описания режимов нормальной эксплуатации и нарушений нормальной эксплуатации действующих и проектируемых реакторных установок с натриевым теплоносителем и проектируемых реакторных установок с тяжёлым жидкометаллическим теплоносителем (свинец или свинец-висмут).

– Проанализированы, систематизированы, обобщены, выбраны наиболее адекватные, а в необходимых случаях модифицированы или доработаны модели групп физических процессов (теплогидравлических, нейтронно-физических и протекающих в твэле), являющихся важными для описания режимов нормальной эксплуатации и нарушений нормальной эксплуатации реакторных установок на быстрых нейтронах с натриевым, свинцовым или свинцово-висмутовым теплоносителями с твэлами с оксидным или нитридным топливом и газовым подслоем.

– Разработаны программные модули: (1) функциональные (теплогидравлический, нейтронно-физический, твэльный) – реализующие моделирование определённых групп физических процессов; (2) сервисные (интегрирующая оболочка, база данных по свойствам материалов и теплоносителей) – для создания на их основе интегрального программного комплекса, предназначенного для моделирования режимов нормальной эксплуатации и нарушений нормальной эксплуатации реакторных установок на быстрых нейтронах с натриевым, свинцовым или свинцово-висмутовым теплоносителями при использовании твэлов с оксидным или нитридным топливом и газовым подслоем.

– Разработан интегральный программный комплекс ЕВКЛИД/V1, отвечающий современным тенденциям в области построения программного обеспечения, путём интеграции программных модулей и внедрения алгоритмов параллельных вычислений.

– Выполнены анализ и оценка на полноту имеющихся экспериментальных данных в области теплогидравлики, нейтронной физики и процессов, протекающих в твэлах с диоксидным, смешанным оксидным уран-плутониевым и смешанным нитридным уран-плутониевым топливом и газовым подслоем, разработаны матрицы верификации отдельных программных модулей и интегрального программного комплекса ЕВКЛИД/V1 в целом.

– На основе современных подходов к анализу неопределённостей и

чувствительности разработана методика оценки погрешностей результатов расчётов, полученных по программным комплексам; на разработанной методической основе выполнены верификационные расчёты интегральным программным комплексом ЕВКЛИД/V1 по перечню задач из матрицы верификации, а также проведены анализ и обобщение полученных результатов верификационных расчётов; оценены погрешности расчёта программным комплексом отдельных параметров.

– Выполнено моделирование отдельных важных для обоснования безопасности режимов нормальной эксплуатации и нарушений нормальной эксплуатации РУ БН-1200 и БРЕСТ-ОД-300 с использованием интегрального программного комплекса ЕВКЛИД/V1, включая оценку неопределённостей расчёта значений параметров.

К перспективам дальнейшей разработки темы исследования следует отнести:

– усовершенствование и доработку моделей отдельных физических процессов. В частности, в области теплогидравлических процессов: переход на трёхжидкостную модель теплогидравлики, уточнение моделей двухфазного течения натриевого теплоносителя, разработка ячейковых моделей двухфазных процессов, протекающих в жидкометаллических теплоносителях, разработка моделей, описывающих динамику паровых пузырей, имеющих распределение по размерам; в области моделирования поведения твэла: разработка многомерных моделей, описывающих НДС топлива и оболочки, разработка усовершенствованных моделей поведения оболочки твэла под облучением; в области нейтронно-физических процессов: повышение эффективности расчётов и учёт гетерогенности в диффузионном приближении;

– разработку моделей процессов и соответствующих программных модулей, которые не вошли в область применимости первой версии интегрального программного комплекса ЕВКЛИД/V1, с целью расширения области его применимости: процессов разрушения элементов а.з., поведения продуктов деления в первом контуре реакторной установки и помещениях АЭС, горения натрия и других;

– верификацию интегрального программного комплекса на результатах новых экспериментальных исследований, полученных на действующих энергетических реакторных установках (БН-600, БН-800) и экспериментальных стендах, большая часть из которых должна быть получена в рамках проектного направления «Прорыв»;

– продолжение выполнения прикладных расчётов реакторных установок на быстрых нейтронах с использованием интегрального программного комплекса;

– дополнение базы данных свойствами материалов по мере получения и оценки соответствующих экспериментальных данных.

Список сокращений и условных обозначений

Сокращения:

а.з.	– активная зона.
АЗ	– аварийная защита.
АЗ-П	– пассивный стержень аварийной защиты.
АО	– акционерное общество.
АТО	– аварийный теплообменник.
АЭС	– атомная электростанция.
БАЗ	– быстрая аварийная защита.
БД	– база данных.
БЗВ	– боковая зона воспроизводства.
БН	– реактор на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем.
БН-600	– реактор на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем электрической мощностью 600 МВт.
БР	– быстрый реактор с жидкометаллическим теплоносителем.
б/р	– безразмерный.
БРЕСТ	– быстрый реактор со свинцовым теплоносителем.
БРЕСТ-ОД-300	– опытно-демонстрационный реактор на быстрых нейтронах со свинцовым теплоносителем электрической мощностью 300 МВт.
БУСМ	– быстрое управляемое снижение мощности.
БФС	– быстрый физический стенд.
ВВЭР	– водо-водяной энергетический реактор.
ВРХ	– внутриреакторное хранилище.
ВТО	– воздушный теплообменник.
ГП	– газовая полость.
ГПД	– газообразный продукт деления.

ГПК	– главный предохранительный клапан.
ГЦН	– главный циркуляционный насос.
КС	– компенсирующий стержень.
МАГАТЭ	– Международное агентство по атомной энергии.
МВТО	– механическое взаимодействие топлива и оболочки.
НДС	– напряженно-деформированное состояние.
НИОКР	– научно-исследовательская и опытно-конструкторская работа.
НИР	– научно-исследовательская работа.
ННЭ	– нарушение нормальной эксплуатации.
НТЗВ	– нижняя торцевая зона воспроизводства.
ОДЭК	– опытно-демонстрационный энергокомплекс.
ОЗПВ	– отсечная задвижка питательной воды.
ОИАЭ	– объект использования атомной энергии.
ОПЗ	– отсечная паровая задвижка.
ОЭСР	– Организация экономического сотрудничества и развития.
ПАЗ	– пассивная аварийная защита.
ПГ	– парогенератор.
ПГТН	– питательный насос с гидротурбоприводом.
ПД	– продукты деления.
ПТО	– промежуточный теплообменник.
ПС	– программное средство.
ПУ	– предохранительное устройство.
пэл	– поглощающий элемент.
РО	– рабочий орган.
РС	– регулирующий стержень.
РУ	– реакторная установка.

САОР	– система аварийного охлаждения реактора.
САОТ	– система аварийного отвода тепла.
СБЗ	– сборка биологической защиты.
СНР	– система нормального расхолаживания реактора.
СНУП	– смешанное нитридное уран-плутониевое топливо.
СПОС	– система пассивной обратной связи.
ССЗ	– сборка стальной защиты.
СТ	– свинцовый теплоноситель.
СУЗ	– система управления и защиты реактора.
т.а.	– тяжёлых атомов.
ТВС	– тепловыделяющая сборка.
ТВЭЛ	– тепловыделяющий элемент.
ТЖМ	– тяжёлый жидкий металл.
ТЖМТ	– тяжёлый жидкометаллический теплоноситель.
УПОС	– устройство пассивной обратной связи.
УСБ	– управляющая система безопасности.
ХФЛ	– холодная фильтр-ловушка.
ЦВД	– цилиндр высокого давления.
ЦЗ	– центральная зона.
ЦС	– цилиндрический слой.
ЧС-68 ХД	– сталь 06Х16Н15М2Г2ТФР.
ЭВМ	– электронно-вычислительная машина.
ЭП-823	– ферритно-мартенситная сталь 16Х12МВСФБР.
ЭСМ	– экстренное снижение мощности.
ЭТВС	– экспериментальная тепловыделяющая сборка.
ЯЭУ	– ядерно-энергетическая установка.

CFD	– (англ. Computational Fluid Dynamics) вычислительная гидродинамика.
LANL	– Лос-Аламосская национальная лаборатория, США.
OpenMP	– (англ. Open Multi-Processing) стандарт для программирования многопоточных приложений на многопроцессорных системах с общей памятью.
ORNL	– Окриджская национальная лаборатория, США.
PIRT	– (англ. Phenomenon Identification and Ranking Table) таблица идентификации и ранжирования явлений.
XML	– (англ. eXtensible Markup Language) расширяемый язык разметки.

Условные обозначения:

A	– площадь проходного сечения канала, м^2
A_i	– площадь межфазной поверхность, м^2
a_i	– плотность площади межфазной поверхности, $1/\text{м}$
a	– температуропроводность, $\text{м}^2/\text{с}$
Bo	– число Бонда
c	– скорость звука, $\text{м}/\text{с}$
C_p	– теплоёмкость при постоянном давлении, $\text{Дж}/\text{кг}/\text{К}$
D	– диаметр канала, м
D_b	– диаметр пузырей, м
D_d	– диаметр капель, м
D_H	– характерный размер, м
D_{ext}	– наружный диаметр кольцевого канала, м
D_{int}	– внутренний диаметр кольцевого канала, м
d	– диаметр стержня, м
E_{dv}	– объёмная доля капель в жидкой фазе
E	– расходная доля капель в жидкой фазе

Fr	– число Фруда
$G=G_f+G_g$	– удельный массовый расход смеси, массовая скорость, кг/м ² /с
$G_k=\varphi_k\rho_kV_k$	– удельный массовый расход фазы, массовая скорость фазы, кг/м ² /с
g	– ускорение свободного падения, м/с ²
H_{pump}	– напор насоса, Па/м
h	– удельная энтальпия фазы, Дж/кг
h_{ik}	– удельная энтальпия фазы k на межфазной границе, Дж/кг
h_{sk}	– удельная энтальпия фазы k на линии насыщения, Дж/кг
h_{*k}	– удельная энтальпия «источника/стока» фазы k , Дж/кг
j	– приведённая скорость, м/с
k_s	– абсолютная шероховатость стенок канала, м
L	– длина участка, м
La	– параметр капиллярности (капиллярная постоянная), м
N_n	– количество неконденсируемых газов
Nu	– число Нуссельта
ΔP_{pump}	– перепад давления насоса, Па
P	– давление, Па
P_h	– гидростатическое давление в горизонтальном канале, Па
Pe	– число Пекле
Q_{ik}	– объёмная мощность теплопереноса между фазой и межфазной границей, Вт/м ³
Q_{wk}	– объёмная мощность теплопереноса между фазой и стенкой канала, Вт/м ³
Q_{wi}	– объёмная мощность теплопереноса между стенкой и межфазной границей, Вт/м ³
Q_v	– объёмная мощность тепловыделения в единице объёма, Вт/м ³

$q = q_{wg} + q_{wf} + q_{wi}$	– плотность полного теплового потока от стенки к теплоносителю, Вт/м ²
q_{wi}	– плотность теплового потока от стенки к межфазной границе, Вт/м ²
q_{wk}	– плотность теплового потока от стенки к фазе, Вт/м ²
Re	– число Рейнольдса
R_n	– удельная газовая постоянная для неконденсируемого газа п, Дж/кг/К
R_0	– универсальная газовая постоянная, Дж/моль/К
s	– шаг решетки в пучках труб, м
S_n	– удельная интенсивность внешнего источника неконденсируемых газов, кг/м ³ /с
S_v	– удельная интенсивность внешнего источника пара, кг/м ³ /с
S_f	– удельная интенсивность внешнего источника жидкого теплоносителя, кг/м ³ /с
T	– температура, К
T_c	– критическая температура, К
T_{ik}	– температура фазы на межфазной границе, К
T_s	– температура насыщения, К
t	– время, с
V	– объём, м ³
v	– скорость, м/с
We	– число Вебера
X_n	– массовая концентрация неконденсируемого газа в газовой фазе, безразмерная
x	– массовое расходное паросодержание
z	– координата вдоль канала, м
α	– коэффициент теплоотдачи, Вт/(м ² К)

Γ_k	– интенсивность массообмена фазы k на межфазной границе, кг/м ³ /с
Γ_v	– интенсивность генерации пара на межфазной границе, кг/м ³ /с
φ_k	– объёмная концентрация фазы
φ	– объёмное газосодержание
λ	– теплопроводность, Вт/(м·К)
μ	– динамическая вязкость, Н·с/м ²
ν	– кинематическая вязкость, м ² /с
ρ	– плотность, кг/м ³
Π	– смоченный периметр, м
π	– число π
σ	– поверхностное натяжение, Н/м
$\sigma_B = 5,67 \cdot 10^{-8}$	– постоянная Стефана-Больцмана, Вт/м ² /К ⁴
τ	– шаг интегрирования по времени, с
τ_{ik}	– сила трения между фазой и межфазной границей, отнесенная на единицу объёма, Н/м ³
τ_{wk}	– сила трения на единицу объёма между фазой и стенкой канала, Н/м ³
τ_{lk}	– потеря давления на локальных сопротивлениях для k-ой фазы, Н/м ³
Нижние индексы	
b	– параметры пузырей.
d	– параметры капель.
f	– параметры жидкой фазы.
g	– параметры газовой фазы.
i	– параметры на межфазной границе.
k	– идентификатор фазы (f, g).
n	– параметры неконденсируемых газов.

rod	– параметры твэла.
s	– параметры в состоянии насыщения.
w	– параметры на стенке.
v	– параметры пара.
$2ph$	– параметры, относящиеся к двухфазному потоку теплоносителя.
Верхние индексы	
w	– параметры на стенке.

Словарь терминов

программный комплекс (расчётный код, программное средство, программа для ЭВМ): Программа на языке программирования (код), предназначенная для численного моделирования физических, химических или иных процессов.

расчётный модуль (программный модуль): Совокупность программ или подпрограмм, реализующих определённую функциональность, такую как моделирование заданных физических процессов, тестирование версий программного обеспечения, проведение многовариантных расчётов и т.д.

интегральный расчётный код (интегральный программный комплекс): Расчётный код (программный комплекс), обеспечивающий в рамках единой расчётной задачи непрерывный автоматизированный расчёт последовательности разнородных событий и явлений, характеризующих данный режим работы моделируемого объекта.

Список литературы

1. Энергетическая стратегия России на период до 2030 г. / Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 13.11.2009 г. №1715-Р.
2. Белая книга ядерной энергетики / Под общ. ред. проф. Е.О. Адамова/ М.: Изд-во ГУП НИКИЭТ. 2001. 269 с.
3. Алексеев П.Н., Асмолов В.Г., Гагаринский А.Ю., Кухаркин Н.Е., Семченков Ю.М., Сидоренко В.А., Субботин С.А., Цибульский В.Ф., Штромбах Я.И. О стратегии развития ядерной энергетики России до 2050 г. // Атомная энергия. 2011. Т.111. Вып. 4. С. 183–196.
4. НП-001-15 «Общие положения обеспечения безопасности атомных станций», федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии, утверждены приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 17 декабря 2015 г. №552.
5. Safety assessment for facilities and activities. General safety requirements. IAEA safety standards. Series No. GSR Part 4 (Rev. 1), IAEA, Vienna, 2016. STI/PUB/1714.
6. Мосунова Н.А. Интегральный код ЕВКЛИД/V1 для обоснования безопасности реакторных установок на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем. Часть 1: Базовые модели // Теплоэнергетика. 2018. №5. С.69–84.
7. РД-03-33-2008 «Инструкция об организации проведения экспертизы программных средств, применяемых при обосновании и (или) обеспечении безопасности объектов использования атомной энергии» // Утверждена приказом №634 от 18 августа 2008 г. Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору.
8. Рачков В.И., Хомяков Ю.С., Швецов Ю.Е. Российские коды для анализа безопасности быстрых реакторов с натриевым теплоносителем // Атомная энергия. 2014. Т.116. Вып. 4. С.216–222.
9. Данилова Е.Н., Кашеваров Ф.Ю., Муратов А.Г., Тюков В.В. Развитие программного комплекса DINAR для обоснования безопасности РУ БРЕСТ-ОД-300 // Годовой отчет НИКИЭТ–2011. Москва. 2011. С.102–2014.
10. Аттестационный паспорт программного средства BURAN. №293 от 14.04.2011.

11. Ашурко Ю.М., Волков А.В., Раскач К.Ф. Разработка программных модулей для расчёта запроектных аварий в быстрых реакторах с учётом пространственно-временной кинетики // Атомная энергия. 2013. Т.114. Вып. 2. С.63–37.
12. Ашурко Ю.М., Волков А.В., Раскач К.Ф., Соломонова Н.В. Влияние нейтронно-физической модели на расчёт тяжёлой аварии с кипением натрия в быстром реакторе // Атомная энергия. 2017. Т.122. Вып. 4. С.183–189.
13. The SAS4A/SASSYS-1 LMW analysis code system. Volume 1. ANL-FRA-1996-3 Volume 1.
14. Tobita Y., Kondo Sa., Yamano H., Morita K., Maschek W., Coste P., Cadiou T. The development of SIMMER-III, an advanced computer program for LMFR safety analysis, and its application to sodium // Nuclear Technology. 2006. V.153. Issue 3. P.245–255.
15. Электронный источник:
https://www.researchgate.net/publication/228363832_The_SIMMER-III_and_SIMMER-IV_Code_Family_2-D_and_3-D_Mechanistic_Simulation_Tools_for_Reactor_Transients_and_Accidents
16. Girault N., Cloarec L., Laborde L., Lebel L., Herranz L., Bandini G., Perez-Martin S., Ammirabile L., Spengler C., Buck M., Fargès B., Poumerouly S. Main outcomes from the JASMIN project: development and validation of ASTEC-Na for severe accident simulation in Na-cooled fast reactors // International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles: Next Generation Nuclear Systems for Sustainable Development. FR17. 26–29 June 2017. Yekaterinburg. Russian Federation. IAEA-CN245-324.
17. Brunett A. J., Fanning T. H. U.S. Sodium Fast Reactor Codes and Methods: Current Capabilities and Path Forward // International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles: Next Generation Nuclear Systems for Sustainable Development. FR17. 26–29 June 2017. Yekaterinburg. Russian Federation. IAEA-CN245-041.
18. Кудашов И.Г., Усов Э.В., Бутов А.А., Вожаков И.С., Прибатурин Н.А., Лежнин С.И., Кузнецова М.Е., Виноградова Ю.Ю., Чалый Р.В., Семенов В.Н., Фокин А.Л., Рыжов Н.И. Модели теплообмена кода СОКРАТ-БН для расчёта кипения натрия в каналах разной геометрии // Атомная энергия. 2014. Т.117. Вып. 5. С.261–265.
19. Bonifetto R., Dulla S., Ravetto P., Savoldi Richard L., Zaninoet R. A full-core coupled neutronic/thermal–hydraulic code for the modeling of lead-cooled nuclear fast reactors // Nuclear Engineering and Design. 2013. V.261. P. 85–94.

20. Bonifetto R., Caron D., Dulla S., Mascolino V., Ravetto P., Savoldi L., Valerio D., Zanino R. Advances in the development of the code FRENETIC for the coupled dynamics of lead-cooled reactors // CERSE-POLITO RL 1572/2015. Torino. 2015. 63 p.
21. Wang G., Gu Zh., Wang Zh., Jin M. Verification of Neutronics and Thermalhydraulics Coupled Simulation Program NTC by the PDS-XADS transient simulation // Progress in Nuclear Energy. 2015. V. 85. P. 659–667.
22. Gu Z., Wang G., Wang Z., Jin M., Wu Y. Transient analyses on loss of heat sink and overpower transient of natural circulation LBE-cooled fast reactor // Progress in Nuclear Energy. 2015. V. 81. P. 60–66.
23. Ishizu T., Endo H., Tatewaki I., Yamamoto T., Shirakawa N. Development of integrated core disruptive accident analysis code for FBR – ASTERIA-FBR // Proceedings of International Congress on Advances in Nuclear Power Plants (ICAPP12). Chicago, USA, 2012.
24. Okawa T., Tatewaki I., Ishizu T., Endo H., Tsuboi Y., Saitou H. Fuel behavior analysis code FEMAXI-FBR development and validation for core disruptive accident // Progress in Nuclear Energy. 2015. V. 82. P. 80–85.
25. Sofu T. and Thomas J.W. U.S. DOE NEAMS Program and SHARP Multi-Physics Toolkit for High-Fidelity SFR Core Design and Analysis // International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles: Next Generation Nuclear Systems for Sustainable Development. FR17. 26–29 June 2017. Yekaterinburg. Russian Federation. IAEA-CN245-054.
26. Алипченков В.М., Болдырев А.В., Вепрев Д.П., Зейгарник Ю.А., Колобаева П.В., Моисеенко Е.В., Мосунова Н.А., Селезнёв Е.Ф., Стрижов В.Ф., Усов Э.В., Осипов С.Л., Горбунов В.С., Афремов Д.А., Семченков А.А. Интегральный код ЕВКЛИД/V1 для обоснования безопасности реакторных установок на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем. Часть 2: Верификация // Теплоэнергетика. 2018. № 9. С. 57–72.
27. Алипченков В.М., Болдырев А.В., Вепрев Д.П., Исаков А.Б., Мосунова Н.А., Моисеенко Е.В., Селезнев Е.Ф., Стрижов В.Ф., Усов Э.В. Интегральный код нового поколения ЕВКЛИД/V1 для моделирования реакторных установок на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем // Сборник тезисов докладов межотраслевого научно-технического семинара «Моделирование динамики ЯЭУ»

- (разработка программных средств, верификация, оценка точности расчета). г. Сосновый Бор, 5–7 июня 2018 г. С. 11–13.
28. Отчет о верификации и обосновании программного средства Динамический интегральный универсальный расчётный код для анализа и обоснования безопасности реакторных установок на быстрых нейтронах с жидкометаллическими теплоносителями. Версия 1.2 (ЕВКЛИД/V1.2) // ИБРАЭ РАН. 2018. Инв.№ 4954-Н.4х.241.9Б.18.1012-2-Р/1. 715 с.
 29. Большов Л.А., Мосунова Н.А., Стрижов В.Ф., Шмидт О.В. Расчётные коды нового поколения для новой технологической платформы ядерной энергетики // Атомная энергия. 2016. Т. 120. Вып. 6. С. 303–312.
 30. Strizhov V., Bolshov L., Mosunova N. Codes of new generation developed for BREAKTHROUGH project // Books of abstracts of the International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles: Next Generation Nuclear Systems for Sustainable Development (FR17). 26–29 June 2017. Yekaterinburg, Russian Federation. IAEA-CN245-184. P. 440.
 31. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2014619799 «Динамический интегральный универсальный расчетный код для анализа и обоснования безопасности реакторных установок на быстрых нейтронах с жидкометаллическими теплоносителями. Версия 1.0». Авторы: Алипченков В.М., Беликов В.В., Белов А.А., Болдырев А.В., Васекин В.Н., Вепрев Д.П., Веретенцев В.А., Вещунов М.С., Мосунова Н.А., Нужный А.С., Озрин В.Д., Селезнев Е.Ф., Стаханова А.А., Стрижов В.Ф., Тарасов В.И., Чернов С.Ю. Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ: 22 сентября 2014 г.
 32. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015660310 «Программный модуль для расчета межконтурных течей в парогенераторе реакторной установки типа БРЕСТ. Версия 1.0». Авторы: Алипченков В.М., Беликов В.В., Веретенцев В.А., Мосунова Н.А. Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 28 сентября 2015 г.
 33. Veshchunov M.S., Boldyrev A.V., Ozrin V.D., Shestak V.E., Tarasov V.I. A new mechanistic code SFPR for modeling of single fuel rod performance under various regimes of LWR operation // Nuclear Engineering and Design. 2011. Vol. 241. P. 2822–2830.
 34. Lassmann K. TRANSURANUS: a fuel rod analysis code ready for use // Journal of Nuclear Materials. 1992. V. 188. P. 295–302.

35. Алипченков В.М., Анфимов А.М., Афремов Д.А., Горбунов В.С., Зейгарник Ю.А., Кудрявцев А.В., Осипов С.Л., Мосунова Н.А., Стрижов В.Ф., Усов Э.В. Базовые положения, текущее состояние разработки и перспективы дальнейшего развития теплогидравлического расчетного кода нового поколения HYDRA-IBRAE/LM для моделирования реакторных установок на быстрых нейтронах // Теплоэнергетика. 2016. № 2. С. 54–64.
36. Усов Э. В., Бутов А. А., Дугаров Г. А., Кудашов И. Г., Лежнин С. И., Мосунова Н. А., Прибатурин Н. А. Система замыкающих соотношений двухжидкостной модели кода HYDRA-IBRAE/LM/V1 для расчета процессов при кипении натрия в каналах энергетического оборудования // Теплоэнергетика. 2017. №7. С.48–55.
37. Бутов А. А., Усов Э. В., Лежнин С. И., Мосунова Н. А. Модель роста паровых снарядов в каналах энергетического оборудования с натриевым теплоносителем // Теплофизика высоких температур. 2017. Т. 55. №4. С. 570–575.
38. Усов Э.В., Лобанов П.Д., Кутлиметов А.Э., Кудашов И.Г., Чухно В.И., Лежнин С.И., Прибатурин Н.А., Кашинский О.Н., Светоносков А.И., Мосунова Н.А. Экспериментальное моделирование гидродинамики и теплообмена при пузырьковом и снарядном режимах течения газа в тяжелом жидком металле // Теплоэнергетика. 2018. № 8. С. 82–87.
39. Алипченков В.М., Беликов В.В., Давыдов А.В., Емельянов Д.А., Мосунова Н.А. Рекомендации по выбору замыкающих соотношений для расчета потерь давления на трение в контурах АЭС с ВВЭР // Теплоэнергетика. 2013 . №5. С. 28–34.
40. Veprev D.P., Boldyrev A.V., Chernov S.Yu., Mosunova N.A. Development and validation of the BERKUT fuel rod module of the EUCLID/V1 integrated computer code // Annals of Nuclear Energy. 2018. V. 113. P. 237–245.
41. Отчет о верификации и обосновании программного средства Программа для решения задач нестационарной теплогидравлики применительно к реакторным установкам и экспериментальным стендам с натриевым, свинцовым и свинцово-висмутовым теплоносителями. Версия 1.1 (HYDRA-IBRAE/LM/V1.1) в 7-ми частях. Инв.№ 4837-Н.4х.241.9Б.17.1018-3-Р/9. ИБРАЭ РАН. 2017. 1773 с.
42. Отчет о верификации и обосновании программного средства Программа расчета температуры, напряженно-деформированного и механического состояния ТВЭЛОВ реакторных установок на быстрых нейтронах с жидкометаллическим

- теплоносителем. Версия 1.1 (БЕРКУТ-V1.1). Инв. 4812-Н.4х.241.9Б.17.1018-1-Р/2-1. ИБРАЭ РАН. 2018. 402 с.
43. Юдов Ю.В. Двухжидкостная модель нестационарной контурной теплогидравлики и её численная реализация в расчётном коде КОРСАР // Теплоэнергетика. 2002. №11. С.17–21.
 44. Юдов Ю.В. Особенности моделирования гидродинамики расслоенного и дисперсно-кольцевого режимов течения двухфазного потока в расчётном коде КОРСАР // Теплоэнергетика. 2002. № 11. С. 30–35.
 45. RELAP5-3D Code Manual. Volume I: Code Structure, System Models and Solution Methods, INEEL-EXT-98-00834, Revision 4.0, June 2012.
 46. Усов Э.В., Прибатурин Н.А., Кудашов И.Г., Бутов А.А., Дугаров Г.А., Мосунова Н.А., Стрижов В.Ф., Иванов Е.Н. Один из этапов верификации теплогидравлического кода HYDRA-IBRAE/LM/V1 для расчета течения натриевого теплоносителя в сборках ТВЭЛОВ // Атомная энергия. 2015. Т. 118. Вып. 6. С. 309–313.
 47. Усов Э.В. Моделирование процессов кипения в потоке натрия в двухжидкостном канальном приближении в задачах обоснования безопасности ядерных энергетических установок / Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, Новосибирск, 2011.
 48. Kottowski H.M., Savatteri C. Fundamentals of liquid metal boiling thermohydraulics // Nuclear Eng. and Design. 1984. V. 82. P. 281–304.
 49. Takahashi K., Fujii-e Y. and Suita T. Incipient Boiling Phenomena of Sodium under Forced Convection by Direct Heating // Journal of Nuclear Science and Technology. 1972. V.9. Issue 10. P. 603–612.
 50. Леонов А.И., Присняков В.Ф. Предельный перегрев натрия при вскипании // ТВТ. 1972. Т.10. №1. С. 149–152.
 51. Зейгарник Ю.А., Литвинов В.Д. Кипение щелочных металлов в каналах / М.: Наука, 1983, 126 с.
 52. Справочник по теплогидравлическим расчётам в ядерной энергетике. Т. 1. Теплогидравлические процессы в ЯЭУ / Под ред. Кириллова П.Л. – М.: ИздАт, 2010.
 53. Руководство по безопасности «Расчетные соотношения и методики расчета гидродинамических и тепловых характеристик элементов и оборудования

водоохлаждаемых ядерных энергетических установок». РБ-040-09. ФБУ «НТЦ ЯРБ». Утверждены приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору №641 от 20.07.2009.

54. Yamaguchi K. Flow pattern and dryout under sodium boiling conditions at decay power levels // Nuclear Engineering and Design. 1987. V.99. P. 247–263.
55. Жуков А.В., Сорокин А.П. Анализ гидравлического сопротивления пучков твэлов быстрых реакторов // Атомная энергия. 1986. Т. 60. Вып. 5. С.317–321.
56. Методика и зависимости для теоретического расчёта теплообмена и гидравлического сопротивления теплообменного оборудования АЭС // РТМ 24.031.05-72 – Министерство тяжёлого, энергетического и транспортного машиностроения, Москва.
57. Кутателадзе С.С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление. – М.: Энергоатомиздат. 1990. 367 с.
58. Руководство по безопасности «Расчетные соотношения и методики расчета гидродинамических и тепловых характеристик элементов и оборудования ядерных энергетических установок с жидкометаллическим теплоносителем». РБ-075-12.
59. Schor A.L., Kazimi M.S. and Todreas N.E. Advances in two-phase flow modeling for LMFBR applications // Nuclear Engineering and Design. 1984. V. 82. P. 127–155.
60. Кузнецов Ю.Н. Теплообмен в проблеме безопасности ядерных реакторов. – М.: Энергоатомиздат. 1989. 296 с.
61. Hibiki T., Lee T.H., Lee J.Y., Ishii M. Interfacial area concentration in boiling bubbly flow systems // Chemical Engineering Science. 2006. V. 61. P. 7979–7990.
62. TRAC-M/FORTAN 90 (VERSION 3.0) LA-UR-00-910. Theory manual / J.W. Spore, J.S. Elson, S.J. Jolly-Woodruff, T.D. Knight, J.-C. Lin, R.A. Nelson, K.O. Pasamehmetoglu, R.G. Steinke, and C. Unal. Los Alamos National Laboratory, July 2000.
63. Clift R. and Gauvin W.H. Motion of Particles in Turbulent Gas Streams // British Chemical Engineering. 1971. V.16. №2–3. P. 229.
64. Ishii M. One Dimensional Drift-Flux Model and Constitutive Equations for Relative Motion between Phases in Various Two-Phase Flow Regimes / Argonne National Laboratory report ANL-77-47, 1977.
65. Уоллис Г. Одномерные двухфазные течения. – М.: Мир. 1972. 442 с.

66. Юдов Ю.В., Волкова С.Н., Мигров Ю.А. Замыкающие соотношения теплогидравлической модели расчетного кода КОРСАР // Теплоэнергетика. 2002. №11. С. 22–29.
67. Юдов Ю. В. Разработка двухжидкостной модели контурной теплогидравлики реакторных установок с водяным теплоносителем / Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Сосновый Бор. 2001.
68. Мигров Ю. А. Разработка программных средств и моделирование теплогидравлических процессов при пассивном отводе остаточного тепла водоводяных реакторов / Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Сосновый Бор. 2011.
69. Вербицкий Ю. Г. Моделирование теплогидравлических процессов в элементах оборудования реакторных установок при низких параметрах теплоносителя / Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Сосновый Бор. 2011.
70. Отчет о НИОКР «Разработка интегрированных систем кодов нового поколения для разработки и обоснования безопасности ядерных реакторов, проектирования атомных электростанций, создания технологий и объектов ядерного топливного цикла. Этап 2017 года. Часть 4». Инв.№ 4837-Н.4х.241.9Б.17.1018-3-КТ/1. ИБРАЭ РАН. 2017 г. 228 с.
71. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики: Учеб. Пособие. – 6-е изд., испр. и доп. – М.: Изд-во МГУ. 1999. 799 с.
72. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. – М.: Изд. Наука. 1966. 688 с.
73. Цветков Ф.Ф., Григорьев Б.А. Тепломассообмен. – Изд. МЭИ. 2005. 550 с.
74. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. – М.: Энергия. 1977. 344 с.
75. Галин Н.М., Кириллов П.Л. Тепломассообмен (в ядерной энергетике). – М.: Энергоатомиздат. 1987. 376 с.
76. Siegel R., Howell J.R. Thermal radiation heat transfer, Third Edition, Hemisphere, 1992.
77. Тарасов В.И. Моделирование диффузионного выхода радиоактивных продуктов деления из диоксида уранового топлива // Атомная энергия. 2009. Т. 106. Вып. 9. С. 319–328.

78. Veshchunov M.S., Ozrin V.D., Shestak V.E., Tarasov V.I., Dubourg R., Nicaise G. Development of mechanistic code MFPR for modelling fission product release from irradiated UO_2 fuel // Nuclear Engineering and Design. 2006. V. 236. № 2. P. 179–200.
79. Veshchunov M.S., Ozrin V.D., Shestak V.E., Tarasov V.I., Dubourg R. Mechanistic modelling of uranium fuel evolution and fission product migration during irradiation and heating // J. Nuclear Materials. 2007. V. 362. № 2–3. P. 327–335.
80. Ozrin V.D. A model for evolution of oxygen potential and stoichiometry deviation in irradiated UO_2 fuel // J. Nuclear Materials. 2011. V. 419. № 1–3. P. 371–377.
81. Tarasov V.I., Veshchunov M.S. Models for fuel porosity evolution in UO_2 under various regimes of reactor operation // Nuclear Engineering and Design. 2014. V. 272. P. 65–83.
82. Veshchunov M.S., Tarasov V.I. An advanced model for grain face diffusion transport in irradiated UO_2 fuel. Part 1: Model formulation // J. Nuclear Materials. 2009. V. 392. № 1. P. 78–84.
83. Tarasov V.I., Veshchunov M.S. An advanced model for grain face diffusion transport in irradiated UO_2 fuel. Part 2. Model implementation and validation // J. Nuclear Materials. 2009. V. 392. № 1. P. 85–89.
84. Veshchunov M.S. New models for UO_2 fuel structure evolution under irradiation in fast reactors // J. Nuclear Materials. 2011. V. 415. № 1. P. 96–103.
85. Leclerc J., Bibilashvili Y., Reshetnikov F., Antipov S., Poplavski V., Zabudko I., Tsykanov V., Mayorshin A., Ikegami T. MOX fuel fabrication and utilization in fast reactors worldwide / Proc. Symp. “MOX fuel cycle technologies for medium and long term deployment”. Vienna. 1999. C&S Papers Series No. 3/P. IAEA. Vienna. 2000. P. 49–73.
86. Белл Д., Глестон С. Теория ядерных реакторов. – М.: Атомиздат, 1974. 489 с.
87. Асатрян Д.С., Березнев В.П., Селезнев Е.Ф. Нейтронно-физический расчетный код CORNER // Изв. вузов. Ядерная энергетика. 2015. № 1. С. 136–143.
88. Березнев В.П. Нодальный Sn-метод в HEX-Z геометрии // Изв. вузов. Ядерная энергетика. 2015. № 3. С. 56–62.
89. Селезнев Е.Ф. Кинетика реакторов на быстрых нейтронах. – М.: Наука. 2013. 239 с.
90. Забродская С.В., Игнатюк А.В., Кощев В.Н., Манохин В.Н., Николаев М.Н., Проняев В.Г. РОСФОНД – Российская национальная библиотека нейтронных данных

// Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. 2007. № 1–2. С. 3–21.

91. Забродская С.В., Николаев М.Н., Цибуля А.М. Библиотеки распадных данных и выходов продуктов деления в системе константного обеспечения БНАБ-93 // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. 2000. № 2. С. 71–78.
92. Отчет о НИР «Разработка частного ТЗ для твэльного кода для БР с различными видами топлива в части разработки базы данных по свойствам материалов твэл и ТВС в различных условиях эксплуатации и аварийных локальных кодов и моделей для описания базовых физических явлений, а также для кросс-верификации отраслевого твэльного кода, требований к верификационной матрице экспериментов». Шифр темы: 040.05.07.10.0700. УДК 621.039. Инв. № 311/596. ИБРАЭ РАН. Москва. 2010.
93. Прошкин А.А., Дьяков А.В., Степанов А.С. Отчет о НИР «Анализ и систематизация данных по свойствам нитридного топлива UN для условий работы реактора на быстрых нейтронах», Москва, 2011 г.
94. Беликов В.В., Вабищевич Н.П., Вабищевич П.Н., Катыхков Ю.В., Мосунова Н.А. База данных по свойствам материалов // Математическое моделирование. 2014. Т. 26. №8. С. 20–30.
95. Савченко И. В., Лежнин С. И., Мосунова Н.А. Рекомендации по значениям и расчётным соотношениям для теплофизических и кинетических свойств жидкого свинца // Теплоэнергетика. 2015. №6. С. 51–54.
96. Отчет о НИОКР «Отбор наиболее надежных данных по теплофизическим и кинетическим свойствам свинцового теплоносителя с применением методики многофакторного анализа. Программная реализация расчёта свойств свинцового теплоносителя» (пункт 2.1.2.2 договора от 29.06.2012 г. № 1/5610). Инв. № 3501-1/5610-1-8. Москва. ИБРАЭ РАН. 2012. 89 с.
97. OECD/NEA. Handbook on lead-bismuth eutectic alloy and lead properties, materials compatibility, thermal-hydraulics and technologies. 2015. NEA № 7268. 949 p.
98. ГСССД 229-07. Плотность свинца, висмута и их эвтектического сплава в конденсированном состоянии, в диапазоне температур 273.15–1500 К / М.: ФГУП «Стандартинформ», 2007.

99. БД ИВТАНТЕРМО. Thermocenter, Glushko. IVTANTHERMO for Windows. Database on thermodynamic properties of individual substances and thermodynamic modeling software / Moscow: Thermocenter, Glushko, 2001.
100. Савченко И.В. Экспериментальное исследование теплопроводности и температуропроводности расплавов легкоплавких металлов и сплавов методом лазерной вспышки / Дис. канд. физ.-мат. наук: 01.04.14/ ИТ СО РАН. Новосибирск, 2011.
101. Konno S. On the variation of thermal conductivity during fusion of metals // Sci. Rept. Tohoku Imp. Univ. 1919. V. 8. P. 169–179.
102. Bidwell C.C. Thermal conductivity of metals // Phys. Rev. 1940. V. 58. № 2. P. 561–564.
103. Rosental M.W. Measurement of thermal conductivity of molten lead / Ph.D., thesis. Cambridge, Mass.: Massachusetts Inst. of tech. 1953. 200 p.
104. Powell R.W., Tye R.P. Experimental determination of the thermal and electrical conductivities of molten metals. – In: Proc. Conf. of Thermodynamic and Transport Properties of Fluids. – London: Inst. Mech. Eng., 1957; 1958. P. 182–187.
105. Никольский Н.А., Калакуцкая Н.А., Пчелкин И.М. Теплофизические свойства некоторых металлов и сплавов в расплавленном состоянии // Вопросы теплообмена. 1959. С. 11–45.
106. Юрчак Р.П., Филлипов Л.П. Тепловые свойства жидких олова и свинца // Теплофизика высоких температур. 1965. Т. 3. № 2. С. 323–327.
107. Дутчак Я.И., Панасюк П.В. Исследование теплопроводности некоторых металлов при переходе из твердого в жидкое состояние // Физ. твердого тела. 1966. Т. 8. № 9. С. 2805–2808.
108. Кржижановский Р.Е. Исследование теплопроводности и электропроводности сплавов и чистых металлов: Дис... д-ра техн. наук. – М: МЭИ, 1970. 215 с.
109. Осипенко В.П. Теплопроводность сплавов олово-свинец и олово-индий в твердом и жидком состояниях // Изв. вузов. Физика. 1970. № 12. С. 25–28.
110. Duggin M.J. The thermal conductivity of liquid Lead and Indium // J. Phys. F: Metal Phys. 1972. V. 2. № 3. P. 433–440.

111. Смирнов Б.П. Экспериментальное исследование теплопроводности твердых и жидких электронных проводников модифицированным методом Кольрауша: Дис... канд. физ.- мат. наук. – М.: МИЭТ, 1974. 164 с.
112. Банчила Л.Н., Филлипов Л.П. Новые измерения комплекса тепловых свойств жидких олова и свинца // Теплофизика высоких температур. 1973. Т. 11. № 3. С. 668–671.
113. Yamasue E., Susa M. Deviation from Wideman-Franz law for the thermal conductivity of liquid tin and lead at elevated temperature // Intern. J. Thermophys. 2003. V. 24. № 3. P. 713–730.
114. Sklyarchuk V., Plevachuk Yu. A modified steady state apparatus for thermal conductivity measurements of liquid metals and semiconductors // Meas. Sci. Technol. 2005. V.16. P. 467–471.
115. Отчет о научно-исследовательской и опытно-конструкторской работе «Разработка интегрированных систем кодов нового поколения для разработки и обоснования безопасности ядерных реакторов, проектирования АЭС, создания технологий и объектов ядерного топливного цикла», Часть 11. ИБРАЭ РАН. Москва. 2013. Инв.№60 ДСП.
116. Круглов А. Б., Круглов В. Б., Рачков В. И., Стручалин П. Г., Харитонов В. С., Асхадуллин Р. Ш., Мартынов П. Н. Методика измерения теплопроводности жидкого свинца в диапазоне температур 350–1000 °С // Теплофизика высоких температур. 2015. Т. 53. №4. С. 564–568.
117. Пашаев Б.П., Палчаев Д.К., Пащук Е.Г. и др. Плотность, скорость ультразвука, электро- и теплопроводность легкоплавких металлов в жидком состоянии. Обзоры по теплофизическим свойствам веществ. – М.: ИВТАН, 1982. № 3(35).
118. IAEA. Thermophysical properties of materials for nuclear engineering: A tutorial and collection of data. Vienna: IAEA, 2008. – 191 p.
119. OECD/NEA. Handbook on lead-bismuth eutectic alloy and lead properties, materials compatibility, thermal-hydraulics and technologies. 2007. NEA № 6195. 687 p.
120. Справочник по свойствам материалов для перспективных реакторных технологий. Том 1. Свойства жидкометаллических теплоносителей. Том 2. Свойства газовых сред / Под общей редакцией доктора технических наук, профессора В.М.Поплавского /

- Бобков В.П., Блохин А.И., Забудько Л.М., Казанцев Г.Н., Румянцев В.Н., Смогалева И.П., Тарасиков В.П. – М.: ИздАт, 2011. 400 с.
121. Станкус С.В., Савченко И.В. Методика измерения теплопроводности и температуропроводности металлических расплавов методом лазерной вспышки / Методика. ГСССД МЭ 202 – 2012. – М.: Стандартиформ, 2012. 43 с.
 122. Mills K.C., Monaghan B.J., Keene B.J. Thermal conductivities of molten metals: Part 1 Pure metals // Intern. Mater. Rev. 1996. V. 41. № 6. P. 209–242.
 123. Monaghan B.J., Mills K.C., Keene B.J. Lorentz relationship and thermal conductivities of liquid metals // High Temp. - High Pressures. 1998. V. 30. P. 457–464.
 124. Термодинамические свойства индивидуальных веществ: справ. изд.: В 4-х т. / Редкол.: В.П. Глушко, Л.В. Гурвич, Г.А. Бергман и др.; АН СССР, Ин-т высоких температур, Гос. ин-т прикл. химии. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука, 1978.
 125. Станкус С.В. Изменение плотности элементов при плавлении. Методы и экспериментальные данные / Новосибирск:, 1990 (Препринт /ИТ СО АН СССР).
 126. Несмеянов А.Н. Давление пара химических элементов/ М.: АН СССР, 1961.
 127. Мустафин Г.М., Шайхиев Г.Ф. О скорости ультразвука в простых веществах в твердом и жидком состояниях // Журнал физической химии. 1983. Т. 57. № 3. С. 703–705.
 128. Fink J. K., Leibowitz L. Thermodynamic and transport properties of sodium liquid and vapor // Argonne National Laboratory. 1995. ANL/RE–95.
 129. Варгафтик Н.Б., Филиппов Л.П., Тарзиманов А.А., Тоцкий Е.Е. Справочник по теплопроводности жидкостей и газов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. 352 с.
 130. Vargaftic N.B., Vinogradov Yu.K., Dolgov V.I. etc. Viscosity and Thermal Conductivity of Alkali Metal Vapors at Temperatures up to 2000 K // International Journal of Thermophysics. 1991. V. 12. No. 1. P. 85–103.
 131. Семенов А.М. Уравнения состояния пара натрия // Теплофизика высоких температур. 1974. Т. 12. № 6. С. 1167–1176.
 132. Кузнецова О.Д., Семенов А.М. Уравнения состояния пара натрия // Теплофизика высоких температур. 1999. Т. 37. №6. С. 871–875.
 133. Кузнецова О.Д., Семенов А.М. Новые справочные данные о термодинамических свойствах натрия // Теплофизика высоких температур. 2000. Т. 38. № 1. С. 30–36.

134. Revised Release on the IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam. International Association for the Properties of Water and Steam, 2007.
135. Wagner W., Kretzschmar H. International Steam Tables. Properties of water and Steam Based on the Industrial Formulation IAPWS - IF97. Second edition. Springer, 2008.
136. Lucas K. Phase Equilibria and Fluid Properties in the Chemical Industry, Dechema, Frankfurt, 1980, 573 p.
137. Poling B. E., Prausnitz John M., O'Connell John P. The Properties of Gases and Liquids, 2004, McGraw-Hill.
138. Reichenberg D. The Viscosities of Pure Gases at High Pressures / Natl. Eng. Lab., Rept. Chem. 38, East Kilbride, Glasgow, Scotland, August 1975.
139. Wilke C. R. A Viscosity Equation for Gas Mixtures // Journal of Chemical Physics. 1950. V. 18. №4. P. 517.
140. Gurvich L.V., Iorish V.S., et. al. IVTANTHERMO – A Thermodynamic Database and Software System for Personal Computer. User's guide, CRC Press, Inc., Boca Raton, 1993.
141. Wassiljewa A. Wärmeleitung in Gasgemischen // Physikalische Zeitschrift. 1904. V. 5. P. 737.
142. Mason E. A. and Saxena S. C. Approximate Formula for the Thermal Conductivity of Gas Mixtures // 1958. Physics of Fluids. V. 1. P. 361.
143. Fuller E. N., and Giddings J. C. A Comparison of Methods for Predicting Gaseous Diffusion Coefficients // Journal of Chromatographic Science. 1965. V. 3. P. 222.
144. Fuller E. N., Schettler P. D., and Giddings J. C. New method for prediction of binary gas-phase diffusion coefficients // Journal of Industrial and Engineering Chemistry. 1966. V. 58. №5. P. 18.
145. Fuller E. N., Ensley K., and Giddings J. C. Diffusion of halogenated hydrocarbons in helium. The effect of structure on collision cross sections // Journal of Chemical Physics. 1969. V. 73. P. 3679.
146. Blanc A. Recherches sur les mobilités des ions dans les gaz // J. Phys. Theor. Appl. 1908. V. 7(1). P. 825–839.
147. Marrero T. R. and Mason E. A. Gaseous Diffusion Coefficients Gaseous Diffusion Coefficients // Journal of Chemical Physics. 1972. V. 1. P. 3.

148. Wilke C.R. and Chang P. Correlation of diffusion coefficients in dilute solutions // AIChE Journal. 1955. V. 1. P. 264.
149. Tyn M.T. and Calus W.F. Diffusion coefficients in dilute binary liquid mixtures // Journal of Chemical and Engineering Data. 1975. V. 20. №1. P.106.
150. Japas M. L., Vázquez E., Alvarez J.L. Density of Sodium along the Liquid-Vapor Coexistence Curve, including the Critical Point // Books of abstracts of the International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles: Next Generation Nuclear Systems for Sustainable Development (FR17). 26 – 29 June 2017. Yekaterinburg, Russian Federation. IAEA-CN245-440. P. 360.
151. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2014619935 «Программа для решения задач нестационарной теплогидравлики применительно к реакторным установкам и экспериментальным стендам с натриевым, свинцовым и свинцово-висмутовым теплоносителями. Версия 1.0». Авторы: Алипченков В.М., Беликов В.В., Веретенцев В.А., Мосунова Н.А. Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ: 25 сентября 2014 г.
152. Холзнер С. XML. Энциклопедия, 2-е издание. – СПб.:Питер, 2004. 1101 с.
153. Электронный ресурс. URL: <https://sourceforge.net/projects/tinysql/>
154. Электронный ресурс. URL: <http://homepages.see.leeds.ac.uk/~earawa/FoX/>
155. Вабищевич Н.П., Вепрев Д.П., Исаков А.Б., Дробышевская И.Н., Колташев Д.А., Мосунова Н.А., Протасов Д.А., Селезнев Е.Ф., Стрижов В.Ф., Шершов А.В. Динамический интегральный универсальный расчетный код для анализа и обоснования безопасности реакторных установок на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем. Учебная версия 1.0. Евклид/Е1.0 : Учебное пособие. – М.: ИБРАЭ РАН, 2017. 136 с. Инв. № 4912-2330.ЦОПК/17-1-УП-2-3.
156. OpenMP Application Program Interface. Version 3.1. July 2011.
157. Березнев В.П. Разработка нейтронно-физического кода CORNER для анализа стационарных и нестационарных процессов в реакторах на быстрых нейтронах / Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва. 2017.
158. Fromont M., Lamontagne J., Asou M., Aubrun I. Behaviour of uranium-plutonium mixed nitride and carbide irradiated in Phenix // Proceedings of GLOBAL-2005, October 9–13, 2005, Tsukuba, Japan, #329.

159. Моисеенко Е.В., Мосунова Н.А. Методика оценки неопределённостей результатов расчёта для задач обоснования безопасности объектов использования атомной энергии // Вопросы радиационной безопасности. 2018. №2. С. 22–32.
160. РД-03-34-2000. Требования к составу и содержанию отчета о верификации и обосновании программных средств, применяемых для обоснования безопасности объектов использования атомной энергии. Введены в действие приказом Госатомнадзора России от 28 декабря 2000 г. №122.
161. Best Estimate Safety Analysis for Nuclear Power Plants: Uncertainty Evaluation // Safety Reports Series No. 52. International Atomic Energy Agency, Vienna, 2008. 200 p.
162. Wilks S. S. Determination of Sample Sizes for Setting Tolerance Limits // The Annals of Mathematical Statistics. 1941. V.12. P. 91–96.
163. Glaeser H. GRS method for uncertainty and sensitivity evaluation of code results and applications // Science and Technology of Nuclear Installations. 2008. Vol. 2008. Article ID 798901.
164. Моисеенко Е. В., Тарасов В. И., Стрижов В. Ф., Филиппов А. С. Анализ неопределённостей в задаче расчёта взаимодействия расплава с материалом конструкций реактора типа ВВЭР // Известия РАН. Энергетика. 2010. Т. 6. С. 105–117.
165. Safety Assessment for Facilities and Activities, IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 4 (Rev.1), IAEA, Vienna. 2016.
166. Детерминистический анализ безопасности атомных станций. Специальное руководство по безопасности. Серия норм МАГАТЭ по безопасности, № SSG-2, Международное агентство по атомной энергии, Вена, 2014.
167. Аттестационный паспорт № 426 от 27 февраля 2018 г. программного средства Программа для решения задач нестационарной теплогидравлики применительно к реакторным установкам и экспериментальным стендам с натриевым, свинцовым и свинцово висмутовым теплоносителями. Версия 1.1 (HYDRA-IBRAE/LM/V1.1).
168. Климонов И.А., Усов Э.В., Дугаров Г.А., Бутов А.А., Кудашов И.Г., Иванов Е.Н., Мосунова Н.А., Стрижов В.Ф., Анфимов А.М., Горбунов В.С., Кузнецов Д.В., Осипов С.Л., Бельтюков А.И. Верификация теплогидравлического кода HYDRA-IBRAE/LM/V1 на основе экспериментов на БН-600 // Атомная энергия. 2017. Т. 122. Вып. 5. С. 258–262.

169. Лобанов П. Д., Усов Э. В., Бутов А. А., Прибатурин Н. А., Мосунова Н. А., Стрижов В. Ф., Чухно В. И., Кутлиметов А. Э. Экспериментальные исследования импульсного впрыска газа в жидкость и верификация на основе полученных данных системного теплогидравлического кода HYDRA-IBRAE/LM // Теплоэнергетика. 2017. №10. С. 79–86.
170. Мосунова Н.А., Алипченков В.М., Зейгарник Ю.А., Усов Э.В. Опыт разработки и верификации теплогидравлического кода HYDRA-IBRAE/LM/V1 / Сборник тезисов докладов Всероссийской конференции с элементами научной школы для молодых учёных XXXIII Сибирский теплофизический семинар, посвящённый 60-летию Института теплофизики им.С.С.Кутателадзе СО РАН, 6–8 июня 2017. г. Новосибирск. 2017. С. 14–15.
171. Алипченков В.М., Беликов В.В., Веретенцев В.А., Колобаева П.В., Мосунова Н.А. Моделирование процессов тепломассообмена тяжёлых жидкометаллических теплоносителей для анализа нестационарных процессов в контурах АЭС / Тезисы Шестой Российской национальной конференции по теплообмену. В 3 томах (27–31 октября 2014 г., Москва). Т.1. – М.: Издательский дом МЭИ. 2014. С. 91–92.
172. Алипченков В.М., Васильев С.И., Веретенцев В.А., Зейгарник Ю.А., Мосунова Н.А., Колобаева П.В., Бреднихина А.Ю., Бутов А.А., Кудашов И.Г., Лежнин С.И., Усов Э.В., Аулов И.В., Красько И.С., Матвеева Н.Г., Рогов А.А., Афремов Д.А., Кудрявцев А.В. Верификация теплогидравлического расчетного кода HYDRA-IBRAE/LM и расчеты компонентов реакторных установок на быстрых нейтронах / Сборник тезисов докладов научно-технической конференции Теплофизика-2013 «Теплофизика реакторов на быстрых нейтронах», Обнинск, 2013. С.154 – 156.
173. Бутов А.А., Дугаров Г.А., Кудашов И.Г., Усов Э.В., Мосунова Н.А., Иванов Е.Н., Полоус М.А., Анфимов А.М., Осипов С.Л. Верификация кода HYDRA-IBRAE/LM/V1 на экспериментах по течению и теплообмену натриевого теплоносителя в одно- и двухфазных режимах / Сборник докладов научно-технической конференции «Теплофизика реакторов на быстрых нейтронах». Обнинск. 2015. С. 265–273.
174. Анфимов А.М., Горбунов В.С., Кузнецов Д.В., Осипов С.Л., Иванов Е.Н., Климонов И.А., Кудашов И.Г., Мосунова Н.А., Усов Э.В. Основные результаты верификации кода HYDRA-IBRAE/LM/V1 на экспериментальных режимах РУ БН-

- 600 / Сборник тезисов научно-технической конференции «Теплофизика реакторов на быстрых нейтронах», г. Обнинск, 6–9 октября 2015. С. 241–243.
175. Alipchenkov V.M., Belikov V.V., Vasilev S.I., Veretentsev V.A., Kolobaeva P.V., Mosunova N.A., Usov E.V., Chudanov V.V. Modeling of liquid metal flow using system thermohydraulic code HYDRA-IBRAE/LM and CFD code CONV-3D / Proceedings of the THINS 2014 International Workshop Modena, Italy, January 20–22, 2014. Paper 4. 10 p.
 176. Алипченков В.М., Мосунова Н. А., Дробышевская И. Н., Васильев С. И., Моисеенко Е. В. Обоснование применимости кода HYDRA-IBRAE/LM/V1 для расчета теплогидравлических процессов в парогенераторе РУ БРЕСТ-ОД-300 / Сборник тезисов докладов Конференции молодых специалистов «Инновации в атомной энергетике». Москва, 2015. С. 53.
 177. Вепрев Д.П., Мосунова Н.А., Стрижов В.Ф. Верификация твэльного модуля БЕРКУТ интегрального кода ЕВКЛИД/V1 на данных экспериментов BORA-BORA и NIMPHE / Сборник трудов XV научной школы молодых ученых ИБРАЭ РАН. – Препринт: Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН. – № IBRAE-2014-02. – М.: ИБРАЭ РАН, 2014. С. 57–60.
 178. Вепрев Д.П., Мосунова Н.А., Стрижов В.Ф. Верификация твэльного модуля интегрального кода ЕВКЛИД/V1 на аналитических тестах / Сборник трудов XVI научной школы молодых ученых ИБРАЭ РАН. – Препринт. – Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН. — № IBRAE-2015-01. – М. ИБРАЭ РАН, 2015. С. 51–54.
 179. Алипченков В.М., Беликов В.В., Васекин В.Н., Вепрев Д.П., Веретенцев В.А., Колобаева П.В., Мосунова Н.А., Стаханова А.А., Стрижов В.Ф., Усов Э.В., Муратов А.Г., Тюков В.В., Анфимов А.М., Горбунов В.С., Кузнецов Д.В., Осипов С.Л. Верификация интегрального универсального расчетного кода ЕВКЛИД/V1 применительно к установкам БРЕСТ-ОД-300 и БН-1200 // МНТК «Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики», третья международная научно-техническая конференция: доклады. – М.: ОАО «НИКИЭТ», 2014. Т.2. С. 175–191.
 180. Аввакумов А.В., Березнев В.П., Васекин В.Н., Вепрев Д.П., Грушин Н.А., Колобаева П.В., Колташев Д.А., Селезнёв Е.Ф., Семёнова М.М., Стаханова А.А., Мосунова Н.А., Стрижов В.Ф., Ханбиков И.Н. Обоснование применимости интегрального кода нового поколения ЕВКЛИД/V1 для расчета РУ БРЕСТ-ОД-300 /

- Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики. IV Международная научно-техническая конференция НИКИЭТ 2016. Сборник докладов. Москва, 2016. Т. 2. С. 8–19.
181. Алипченков В.М., Беликов В.В., Васекин В.Н., Вепрев Д.П., Веретенцев В.А., Колобаева П.В., Мосунова Н.А., Стаханова А.А., Стрижов В.Ф. Верификация интегрального универсального расчетного кода ЕВКЛИД/V1 // МНТК «Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики», третья международная научно-техническая конференция: тезисы докладов. – М.: ОАО «НИКИЭТ», 2014. С. 189–190.
 182. Отчет о НИР «Разработка, верификация и подготовка к аттестации проектных кодов для выполнения проектно-конструкторских работ и обоснования безопасности реакторной установки БН-1200. Этап 2014–2015 годов. Доработка верификационного отчета по замечаниям экспертов по программе расчета статических параметров РУ БН при принудительной циркуляции теплоносителя (ТР-БН)». ОКБМ Африкантов. Инв.№ а74847. 2014.
 183. Отчет о НИР «Верификация программы BURAN». ОКБМ Африкантов. Инв.№ 11431/09От. 2009.
 184. Отчет о НИР «Верификация программного средства Piping Systems FluidFlow». ОКБМ Африкантов. 2012.
 185. Некоторые исходные данные по установке БОР-60 для верификации расчетных программ / Техническая справка ГНЦ НИИАР. Инв. № О-5469. 2003.
 186. Опыт работы оборудования АЭС БОР-60 в 1971–1972 гг. и основные экспериментальные работы / Сборник материалов. Инв. № (по учёту НИИАР) 0-553. 1972.
 187. Казачковский О.Д., Антипин Г.К., Афанасьев В.А., Бай В.Ф., Борисюк В.А., Борисюк Е.В., Грязев В.М., Ефимов В.Н., Кевролев В.П., Кондратьев В.И., Краснояров Н.В., Смирнов А.М. Аварийное расхолаживание установки БОР-60 // Атомная энергия. 1973. Т.34. Вып.5. С. 341–344.
 188. Антипин Г.К., Кондратьев В.И., Масный В.Ф., Тимченко В.Л. Расчет расхолаживания пакета реактора БОР-60 в газовой среде / НИИАР, 1972.

189. Подготовка исходных данных для разработки нодализационной схемы РУ по программе СОКРАТ-БН / Техническая справка, ОКБМ Африкантов. Инв. № 77/7-242 от 09.09.2010.
190. Подготовка экспериментальных данных для верификации кода СОКРАТ-БН / Техническая справка. ОКБМ Африкантов. Инв. № 77/7-608 от 15.08.2011.
191. Подготовка исходных данных и проведение верификации кода HYDRA-IBRAE/LM/V1.1 применительно к РУ БН-1200 / Отчет о НИР, АО «ОКБМ Африкантов». Инв.№ 77/7-294 от 09.09.2014.
192. Экспериментальное исследование эффективности естественной циркуляции в натриевых контурах энергоблока БН-600 после срабатывания БАЗ с мощности 50 % номинальной (эксперимент 07.03.84) / Отчет, БАЭС. инв.№ (по учёту БАЭС) 21-109-8502 От. 1985.
193. Экспериментальное исследование эффективности естественной циркуляции в натриевых контурах энергоблока БН-600 при снижении мощности реактора с 19 % до $(3 \div 1)$ % номинальной для моделирования режима отвода остаточного тепловыделения при обесточивании 4, 5, 6 ГЦН 1, 2 и срабатывании БАЗ / Предварительный отчет по результатам опыта $(15 \div 16)$.05.82. БАЭС. Инв.№ (по учёту БАЭС) 21-109-8213 От. 1982.
194. Формирование базы экспериментальных данных по нейтронной физике и теплогидравлике на основе имеющейся информации. Разработка разделов верификационного отчета, содержащего описание экспериментальных стендов и результатов экспериментов / Отчет о НИР, ГНЦ РФ–ФЭИ. 2011.
195. Подготовка исходных данных по проведенным в ОАО «НПО ЦКТИ» экспериментам по продольному обтеканию натриевым теплоносителем пучков стержней с относительным шагом 1,1 в формате, пригодном для использования данных для верификации системных теплогидравлических расчетных кодов / Отчет о НИР, ОАО «НПО ЦКТИ». Инв.№ б/н. Договор №106–14/10 от 04.04.2015. 2015.
196. Фромзель В.Н., Фромзель Л.В., Вдовец Н.В. Методика определения эффективной теплопроводности сборки ТВЭЛов и расчет температурного поля в сборках, размещенных в вертикальных контейнерах / В сб. «Процессы тепломассообмена и гидродинамики в системах безопасности АЭС с ВВЭР-640». – СПб, 1997. С. 139–150.

197. Исследование теплообмена на однетрубной модели испарителя БН-350 / Отчет о НИР, ФЭИ; Руководитель О.Д. Казачковский. – ТФ-871. Обнинск, 1976. – 39 с.: Исполн.: Н.М. Турчин, Н.С. Грачев, В.А. Прохорова и др.
198. Анализ и обобщение результатов 2010–2012 гг. по разработке интегрированных систем кодов для РУ БН (заключительный). Часть 1 // Отчет о НИР, ГНЦ РФ–ФЭИ, 2012.
199. Кириллов П.Л., Турчин Н.М., Грачев Н.С. Исследования теплообмена на однетрубных моделях испарителя БН-350 // ФЭИ-1575. Обнинск: ФЭИ, 1984.
200. Зейгарник Ю.А., Литвинов В.Д. Исследование гидравлического сопротивления при кипении натрия в трубе // Теплофизика высоких температур. 1977. №5. С. 1116–1118.
201. Зейгарник Ю.А., Литвинов В.Д. Экспериментальное исследование теплообмена и потерь давления при кипении натрия в вертикальной трубе / В сб. Тепломассообмен-V. Том 3. Ч.1. Минск. 1975. С. 147–156.
202. Kottowski H., Savatteri C. Fundamentals of liquid metal boiling thermohydraulics // Nuclear Engineering and Design. 1984. V.82. P. 281–304.
203. Wall D.N., Cooper A.A. An analysis of the pressure drop and dryout results from the second ISPRA 12-pin gridded cluster // Proc. 12th Liquid Metal Boiling Working Group (LMBWG) (Joint Research Centre Ispra, Ispra, Italy, 15–17 October 1986). 1987. P. 191–220.
204. Savatteri C., Warnsing R., and Kottowski H. Two-phase flow pressure drop of boiling sodium in grid and wire-spaced bundles // Proc. 13th Liquid Metal Boiling Working Group (LMBWG) (Winfrith Atomic Energy Establishment, Winfrith, UK, 27–29 September 1988). 1989. P. 99–120.
205. Kottowski H.M., Savatteri C., Hufschmidt W. A new critical heat flux correlation for boiling liquid metals // Nuclear Science and Engineering. 1991. V. 108. P. 396–413.
206. Kikuchi Y., Haga K. Sodium boiling experiments in a 19-pin bundle under loss-of-flow conditions // Nuclear Engineering and Design. 1981. V.66. P. 357–366.
207. Kaiser A., Peppler W. Sodium boiling experiments in an annular test section under flow rundown conditions. Report KFK-2389. 1977.
208. Aberle J., Brook A. J., Peppler W. Sodium Boiling Experiments in a 7-Pin Bundle under Flow Rundown Conditions. Report KFK-2378. 1976.

209. Temperature Distribution In A 19-rod Simulated LMFBR Fuel Assembly In a Hexagonal Duct (Fuel Failure Mockup Bundle 2A) — Record Of Experimental Data / M.H.Fontana, R. E.MacPherson, P. A.Gnadt, L. F.Parsly, J. L. Wantland // ORNL-TM-4113. Oak Ridge National Laboratory, USA, 1973.
210. Steady-State Sodium Tests in a 19-Pin Internally Guard-Heated Simulated LMFBR Fuel Assembly with a Six-Channel Internal Blockage-Record of Experimental Data for THORS Bundle 3C / N.Hanus, W. R.Nelson, N. E.Clapp, M. H.Fontana, P. A.Gnadt, R. H.Thornton, J. L. Wantland. ORNL-TM-6498. Oak Ridge National Laboratory, USA, 1979.
211. Dynamic boiling tests in a 19-pin simulated LMFBR fuel assembly / J.L.Wantland, N.E.Clapp, M.H.Fontana, P.A.Gnadt, N.Hanus // Report CONF-771109-77; ANS winter meeting; San Francisco, CA, USA, 1977.
212. Бартоломей Г.Г., Брантов В.Г., Молочников Ю.С., Харитонов Ю.В. Экспериментальное исследование истинного объёмного паросодержания при кипении с недогревом в трубах // Теплоэнергетика. 1982. №3. С. 20–22.
213. Кириллов П. Л., Комаров Н. М., Субботин В. И. и др. Измерение некоторых характеристик парожидкостного потока в круглой трубе при давлении 68,6 бар // Препринт ФЭИ-421. 1973. Обнинск.
214. Кириллов П. Л., Комаров Н. М., Суворов М. Я. и др. Результаты комплексных экспериментов по изучению гидродинамических характеристик дисперсно-кольцевого пароводяного потока высокого давления в трубе // Препринт ФЭИ-1447. 1983. Обнинск.
215. Becker K. M., et al. An Experimental Investigation of Post Dryout Heat Transfer, KTH-NEL-33, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, May 1983.
216. Bennett A. W., et al. Heat Transfer to Steam-Water Mixtures Flowing in Uniformly Heated Tubes in Which the Critical Heat Flux Has Been Exceed, AERE-R5373, October 1976.
217. Ремизов О.В., Воробьев В.А., Сергеев В.В., Катан И.Б. Библиотека данных по критическим паросодержаниям в круглых трубах различной длины / Отчет о НИР/ФЭИ. Инв. № 6590. 1982
218. Мальцев Б.К., Хлесткин Д.А., Келлер В.Д. Экспериментальное исследование истечения насыщенной и недогретой воды при высоких давлениях // Теплоэнергетика. 1972. №6. С. 61–63.

219. Хлесткин Д.А., Канищев В.П. Характерные режимы истечения горячей воды // Теплоэнергетика. 1977. №8. С. 69–71.
220. Хлесткин Д.А., Канищев В.П. Экспериментальное исследование истинного объемного паросодержания по длине канала при истечении метастабильной жидкости // Теплоэнергетика. 1978. №2. С. 47–50.
221. Хлесткин Д.А., Канищев В.П. Исследование процессов истечения высоковлажной пароводяной смеси // Теплоэнергетика. 1979. №5. С. 67–69.
222. BN-600 Hybrid Core Benchmark Analysis, IAEA-TECDOC-1623.
223. BN-600 MOX Core Benchmark Analysis, IAEA-TECDOC-1700.
224. Зизин М.Н., Шишков Л.К., Ярославцева Л.Н. Тестовые нейтронно-физические расчёты ядерных реакторов. – М.: Атомиздат, Москва. 1980. 88 с.
225. Benchmark analyses on the control rod withdrawal tests performed during the PHÉNIX End-of-Life experiments, IAEA-TECDOC-1742.
226. Evaluation of Benchmark calculations on a fast power reactor core with near zero sodium effect, IAEA, Vienna, 1994, IAEA-TECDOC-731, ISSN 1011-4289.
227. Japan's experimental fast reactor JOYO MK-I core: sodium-cooled uranium-plutonium mixed oxide fueled fast core surrounded by UO₂ blanket // International Handbook of Evaluated Reactor Physics. Benchmark Experiments, NEA/NSC/DOC (2006) 1, Organization for Economic Cooperation and Development. Nuclear Energy Agency (OECD-NEA), March 2009 Edition.
228. Komano Y., Takeda T., Sekiya T. Improved Few-Group Coarse-Mesh Method for Calculating Three-Dimensional Power Distributions in Fast Breeder Reactor // Nuclear Energy Agency, Report NEA/NEACRP/L/204, 1978.
229. Hebert A. A Raviart-Thomas-Schneider Solution of the Diffusion Equation in Hexagonal Geometry // Annals of Nuclear Energy. 2008. V.35. Issue 3. P. 363–376.
230. Электронная ссылка: <http://www.mscsoftware.ru/products/marc>
231. Matveev V.I. et al. Report at International Symposium on Physics of Fast Reactors / Tokyo, 1973. V. 2. P. 837.
232. Кочетков А.Л., Семенов М.Ю., Хомяков Ю.С. и др. Верификация программы CARE в реакторных трансмутационных экспериментах на БН-350, БН-600 и БОР-60 / Сб. «Доклады семинара НЕЙТРОНИКА-2003». – г. Обнинск: ГНЦ РФ – ФЭИ, 2003.

233. Доработка модуля расчёта выгорания и подготовка раздела верификационного отчета с результатами верификации на экспериментах с КЭТВС-1. Этап 2017 года / Отчет о НИР. Инв. № 4912-2330.ЦОПК/17-1-ОТ-1.3. 244 с.
234. JNDC Nuclear Data Library of Fission Products, Second Version, JAERY 1320, 1990.
235. Hermann O.W., Westfall R.M. ORIGEN-S: SCALE system module to calculate fuel depletion, actinide transmutation, fission product buildup and decay, and Association source terms // NUREG/CR-0200. 1995. Revision 4. V.2. Section F7.
236. Колобашкин В.М., Рубцов П.М., Ружанский П.А., Сидоренко В.В. Радиационные характеристики облученного ядерного топлива. – М.: Энергоатомиздат. 1983. 384 с.
237. Yarnell J. L., Bendt P. J. Calorimetric fission product decay heat measurements for ^{239}Pu , ^{233}U , and ^{235}U // NUREG/CR-0349, LA-7452-MS, Informal report, R-3, 1978, 22 p.
238. Yarnell J. L. John, Bendt P. J. Decay heat from products of ^{235}U thermal fission by fast-response boil-off calorimetry // LA-NUREG-6713, NRC-3, 1977, 34 p.
239. Fission-product energy release for times following thermal-neutron fission of ^{235}U between 2 and 14000 s / J.K.Dickens, T.A.Love, J.W. McConnell and R.W.Peelle // Nucl. Sci. Eng. 1980. V.74. P. 106–129.
240. Fission-product energy release for times following thermal-neutron fission of ^{239}Pu and ^{241}Pu between 2 and 14000 s / J.K.Dickens, T.A.Love, J.W. McConnell and R.W.Peelle // Nucl. Sci. Eng. 1981. V.78. P. 126–146.
241. Baumung K. Measurements of ^{235}U Fission-Product Decay Heat Between 15 s and 4000 s // KFK-3262, Kernforschungszentrum Karlsruhe, 1981.
242. Хомяков Ю.С. Расчетно-экспериментальные исследования спектральных характеристик нейтронных полей быстрых реакторов в обоснование наработки радиоактивных изотопов / Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, Обнинск, 1994. 154 с.
243. Забегаев В.П., Богатов С.В., Гаврилов А.В., Бабенко Г.В., Розенбаум Е.Л. Экспериментальные исследования остаточного тепловыделения отработавших сборок реактора БН-600 // Отчет БАЭС №211103, Заречный. 2003. 37 с.
244. OECD/NEA Benchmarking of thermal-hydraulic loop models for lead-alloy-cooled advanced nuclear energy systems. Phase 1: Isothermal forced convection case // NEA/NSC/WPFC/DOC(2012)17, 2012. 232 p.

245. Ma W., Karbojian A., Sehgal B.R., Dinh T.-N. Thermal-hydraulic performance of heavy liquid metal in straight-tube and U-tube heat exchangers // Nuclear Engineering and Design. 2009. V. 239. Issue 7. P. 1323–1330.
246. Ma W., Karbojian A., Hollands T., Koch M.K. Experimental and numerical study on lead-bismuth heat transfer in a fuel rod simulator // Journal of Nuclear Materials. 2011. V.415. Issue 3. P. 415–424.
247. Ma W., Bubelis E., Karbojian A., Sehgal B.R., Coddington P. Transient experiments from the thermal-hydraulic ADS lead bismuth loop (TALL) and comparative TRAC/AAA analysis // Nuclear Engineering and Design. 2006. V. 236. Issue 13. P. 1422–1444.
248. Ma W., Bubelis E., Karbojian A., Sehgal B. R. Experimental study on natural circulation and its stability in heavy liquid metal loop // Nuclear Engineering and Design. 2007. V. 237. Issue 15–17. P. 1838–1847.
249. Смогалева И.П., Грабежная В.А., Шарыпина В.М., Артамонов С.Н. Наполнение базы данных верификационных экспериментов по теплогидравлике парогенераторов РУ БР / Отчет о НИОКР, ФГУП «ГНЦ РФ–ФЭИ», в рамках государственного контракта № Н.4Х.46.90.12.1087 от 07.06.2012. 2012. 22 с.
250. Проведение испытаний модели парогенератора (модель витого парогенератора) / Отчет о НИОКР, ФГУП «ГНЦ РФ – ФЭИ». Инв. № 7353 от 25.11.2011.
251. Проведение испытаний секции модели ПГ в пусковых и частичных режимах (этап 3.1.1) / Отчет о НИОКР, ФГУП «ГНЦ РФ–ФЭИ». Инв. № 12805 от 15.08.2012.
252. Верификация численной модели ПГ РУ БРЕСТ на базе кода RELAP5 / Отчет ОАО «НИКИЭТ». Инв. № 231-168-10058 от 24.04.2013.
253. Ciampichetti A., Pellini D., Agostiny P., Benamati G., Forgiione N., Oriolo F. Experimental and computational investigation of LBE – water interaction in LIFUS 5 facility // Nuclear Engineering and Design. 2009. V. 239. Issue. 11. P. 2468–2478.
254. Тарасова Н.В. Гидравлическое сопротивление при кипении воды и пароводяной смеси в обогреваемых трубах и кольцевых каналах // Труды ЦКТИ. 1965. № 59.
255. Тарасова Н. В., Хлопушин В. И., Боронина Л. В. Локальное гидравлическое сопротивление при поверхностном кипении воды в трубах // Теплофизика высоких температур. 1967. Т. 5. С. 130–136.
256. Разработка интегрированных систем кодов нового поколения для разработки и обоснования безопасности реакторов, проектирования атомных станций, создания

- технологий и объектов ядерного топливного цикла. Этап 2014–2016 годов. Этап 8 (промежуточный) / Отчет о НИОКР. Инв. № 0083-ДСП. Государственный контракт от 17.02.2014 №Н.4х.44.9Б.14.1037 с доп. соглашением от 15.01.2015 №1, с доп. соглашением от 22.06.2015 №2. Глава 58. С. 2952–3126.
257. Подготовка данных по экспериментам, проведенным в ОАО «НПО ЦКТИ», в формате, пригодном для использования данных для верификации канального теплогидравлического расчетного кода // Отчет о НИОКР, АО «НПО ЦКТИ», в рамках договора № 1084/2013/31115-13/10 от 01.04.2013. 2013. 22 с.
258. Подготовка данных по экспериментам, проведенным в ОАО «НПО ЦКТИ», в формате, пригодном для использования данных для верификации системных теплогидравлических расчетных кодов. Этап 2014 г. // Отчет о НИОКР, АО «НПО ЦКТИ», в рамках договора № 106-14/10 от 04.04.2014. 2014. 48 с.
259. Pacio J., Daubner M., Fellmoser F., Litfin K., Marocco L., Stieglitz R., Taufall S., Wetzel T. Heavy-liquid metal heat transfer experiment in a 19-rod bundle with grid spacers // Nuclear Engineering and Design. 2014. V. 273. P. 33–46.
260. ОАО «НИКИЭТ». Система аварийного охлаждения реакторного блока. Пояснительная записка. БРЕСТ.2.04.00.000 ПЗ, инв. № ПЗ.421-0903, 2014.
261. ОАО «НИКИЭТ». Теплообменник расхолаживания. Пояснительная записка. БРЕСТ.2.01.21.000 ПЗ, инв. № ПЗ.421-0910, 2014.
262. ОАО «НИКИЭТ». Комплект конструкторской документации 173.144.000. Макет системы аварийного охлаждения реактора. Инв. № Е 421.456. 2012.
263. ОАО «НИКИЭТ». Протокол 232.957 ПР. Экспериментальное определение интегральной мощности модели теплообменника САОР, инв. № Пр.232-0610, 2013.
264. ОАО «НИКИЭТ». Испытание модели опускной трубы парогенератора С-300. Программа и методика. № ПМ.231-0845, 2012.
265. ОАО «НИКИЭТ». Испытания модели опускного участка парогенератора С-300, № 231-168-9618, 2012.
266. ОАО «НИКИЭТ». Исследование термического сопротивления пароводяного зазора на модели опускной трубы ПГ РУ БРЕСТ-ОД-300: анализ экспериментальных данных. № 231-168-10441, 2013.
267. ОАО «НИКИЭТ». Исследование термического сопротивления теплоизолирующего зазора на модели опускной трубы ПГ РУ БРЕСТ-ОД-300 с дистанционированием центральной трубы продольными рёбрами (анализ экспериментальных данных). № 231-168-10949, 2014.

268. Семченков А.А., Новосельский О.Ю., Лемехов Ю.В., Хижняк А.Г., Шпанский С.В., Шишов В.П. Исследование теплоизоляционных свойств «пароводяного зазора» в опускных трубах парогенератора // Атомная энергия. 2013. Т. 115. Вып. 5. С.246–250.
269. Тихоненко Л.К. Компьютерный банк опытных данных по комплексу экспериментальных исследований стационарного истечения водяного теплоносителя через элементы циркуляционных контуров парогенерирующих установок / Отчет о НИР / ЭНИС ВНИИАЭС № 1.375. – Электрогорск, 1990.
270. Алешин В.С., Калайда Ю.А., Фисенко В.В. Исследование процесса истечения кипящей воды высоких параметров через цилиндрические каналы различной геометрии / В кн.: Тезисы докладов 3-ей Всесоюзной конференции по теплообмену и гидродинамике в элементах энергооборудования. Л., ЦКТИ, 1967.
271. ОАО «НИКИЭТ». Исследование гидравлических характеристик полномасштабного макета бесчехловой сборки ТВС ЦЗ РУ БРЕСТ-ОД-300 на ЭУСТ. Протокол 232.1502, 2016.
272. Исследование динамических и гидравлических характеристик модели контура. Протокол 232.1283. Тема 13.168-002. АО «НИКИЭТ». 2015. 57 с.
273. Аттестационный паспорт программного средства MCU-BR с библиотекой констант MDBBR50. №405 от 08.12.2016.
274. Алипченков В.М., Васильев С.И., Веретенцев В.А., Беликов В.В., Колобаева П.В., Лежнин С.И., Мосунова Н.А., Назарова С.Н., Афремов Д.А., Кудрявцев А.В., Семченков А.А. Расчёты некоторых элементов теплообменного оборудования, отдельных процессов и явлений, протекающих в реакторных установках с тяжёлым жидкометаллическим теплоносителем, кодом HYDRA-IBRAE/LM/V1 / Сборник докладов научно-технической конференции «Теплофизика реакторов на быстрых нейтронах (Теплофизика–2014)», 14–17 октября 2014 г. – г. Обнинск: ГНЦ РФ – ФЭИ. 2015. С. 227–236.
275. Анфимов А.М., Горбунов В.С., Кузнецов Д.В., Осипов С.Л., Мосунова Н.А., Усов Э.В., Чалый Р.В. Основные результаты применения системных теплогидравлических кодов нового поколения при обосновании безопасности реактора БН-1200 / Сборник тезисов докладов Всероссийской конференции с элементами научной школы для молодых учёных XXXIII Сибирский теплофизический семинар, посвящённый 60-летию Института теплофизики им.С.С.Кутателадзе СО РАН, 6–8 июня 2017, г. Новосибирск. 2017. С. 223.
276. Белов А.А., Васекин В.Н., Вепрев Д.П., Веретенцев В.А., Вещунов М.С., Мосунова Н.А., Полоус М.А., Стаханова А.А., Стрижов В.Ф., Муратов А.Г., Тюков В.В. Расчет

- стационарных и переходных режимов работы ядерного реактора со свинцовым теплоносителем интегральным кодом ЕВКЛИД/V1 // Вопросы атомной науки и техники. Серия: ядерно-реакторные константы. 2015. Вып. 3. С. 91–102.
277. Белов А.А., Васекин В.Н., Вепрев Д.П., Веретенцев В.А., Вещунов М.С., Мосунова Н.А., Полоус М.А., Стаханова А.А., Стрижов В.Ф. Расчет стационарных и переходных режимов работы реакторной установки со свинцовым теплоносителем интегральным кодом ЕВКЛИД/V1 / Сборник докладов четвертой конференции ТЖМТ. Обнинск: ФГУП «ГНЦ РФ-ФЭИ», 2013. С. 171–183.
278. Mosunova N. Coupled calculations for the fast reactors safety justification with the EUCLID/V1 integrated computer code // Books of abstracts of the International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles: Next Generation Nuclear Systems for Sustainable Development (FR17), 26 – 29 June 2017, Yekaterinburg, Russian Federation, IAEA-CN245-184. P. 156.
279. Колташев Д. А., Мосунова Н. А., Селезнёв Е. Ф., Шершов А. В. Моделирование стационарных и нестационарных режимов работы реакторной установки на быстрых нейтронах со свинцовым теплоносителем по коду ЕВКЛИД/V1 / Сборник тезисов докладов 13-й Международной научно-практической конференции по атомной энергетике «Безопасность, эффективность, ресурс». – Севастополь, Оргкомитет МНПК АЭ-2017. С. 110–111.
280. Установка реакторная Исходные данные для теплогидравлических расчетов и расчетов в обоснование безопасности. БРЕСТ.2.00.00.000 Д1. Инв. №Е421-4853.2015. 259 с.
281. Petruzzi A., D’Auria F. Thermal-Hydraulic System Codes in Nuclear Reactor Safety and Qualification Procedures // Science and Technology of Nuclear Installations. 2008. Volume 2008. Article ID 460795. 16 p. <http://dx.doi.org/10.1155/2008/460795>
282. Разработка интегрированных систем кодов нового поколения для разработки и обоснования безопасности ядерных реакторов, проектирования атомных электростанций, создания технологий и объектов ядерного топливного цикла. Этап 2014-2016 годов. Этап 8 / Отчет о НИОКР. Инв. № 0083-ДСП. Москва. ИБРАЭ РАН. 2015.
283. Подготовка исходных данных для верификации кода ЕВКЛИД/V1 / Отчет о НИР. ОКБМ Африкантов. Инв. №77/7-296 от 09.09.2014.
284. Разработка нодализационных схем оборудования РУ БН-1200 / Отчет о НИОКР. ОКБМ Африкантов. Инв. № 77/7-384, договор от 14.10.2013.

Список иллюстративного материала

Рисунок 1.1 – Структура интегрального кода ЕВКЛИД/V1.

Рисунок 2.1 – Излучательная способность $\varepsilon_g(\bar{T}, ps)$ водяного пара.

Рисунок 2.2 – Постановка задачи теплообмена излучением в плоском слое газа.

Рисунок 2.3 – Цилиндрический слой: геометрические размеры и давления.

Рисунок 2.4 – Соседние слои i и $i+1$ под нагрузкой.

Рисунок 2.5 – Газовыделение из оксидного топлива по результатам послереакторных исследований твэлов реакторов БР-10, БОР-60, БН-350.

Рисунок 2.6 – Пространственное расчётное разбиение G7.

Рисунок 3.1 – Графический интерфейс пользователя базы данных по свойствам материалов.

Рисунок 3.2 – Экспериментальные данные по теплопроводности свинца.

Рисунок 3.3 – Сравнение результатов экспериментальных измерений теплопроводности свинца, выполненных в 2011 [100] и 2013 [115, 116] годах в ИТ СО РАН и НИЯУ МИФИ.

Рисунок 3.4 – Расчётные области для воды и пара.

Рисунок 4.1 – Схема вызовов функций программных модулей под оболочкой SMART_LM.

Рисунок 4.2 – Общий вид препроцессора интегрального программного комплекса ЕВКЛИД/V1.

Рисунок 4.3 – Распределение времени по подпрограммам на различном числе ядер для Задачи 1.

Рисунок 4.4 – Параллельное ускорение различных подпрограмм и общего времени выполнения для Задачи 1.

Рисунок 4.5 – Распределение времени по подпрограммам на различном числе ядер для Задачи 2.

Рисунок 4.6 – Параллельное ускорение различных подпрограмм и общего времени выполнения для Задачи 2.

Рисунок 4.7 – Распределение времени по подпрограммам на различном числе ядер для Задачи 3.

Рисунок 4.8 – Параллельное ускорение различных подпрограмм и общего времени выполнения для Задачи 3.

Рисунок 4.9 – Распределение времени по подпрограммам на различном числе ядер для Задачи 1.

Рисунок 4.10 – Параллельное ускорение различных подпрограмм и общего времени выполнения для Задачи 1.

Рисунок 4.11 – Распределение времени по подпрограммам на различном числе ядер для Задачи 3.

Рисунок 4.12 – Параллельное ускорение различных подпрограмм и общего времени выполнения для Задачи 3.

Рисунок 4.13 – Параллельное ускорение твэльного модуля на 24-ядерном процессоре, ОС Linux, моделируется конфигурация из 24 твэлов.

Рисунок 4.14 – Параллельное ускорение твэльного модуля на 6-ядерном процессоре, ОС Windows, моделируется конфигурация из 12 твэлов.

Рисунок 4.15 – Параллельное ускорение твэльного модуля на 6-ядерном процессоре, ОС Linux, моделируется конфигурация из 12 твэлов.

Рисунок 5.1 – Этапы методики оценки погрешностей результатов расчёта программного комплекса.

Рисунок 7.1 – Расчётная модель первого контура РУ БРЕСТ-ОД-300.

Рисунок 7.2 – Картограмма а.з. РУ БРЕСТ-ОД-300.

Рисунок 7.3 – Разбиение а.з. РУ БРЕСТ-ОД-300 по высоте.

Рисунок 7.4 – Геометрия твэла ТВС ЦЗ.

Рисунок 7.5 – Временные зависимости температуры СТ на входе и выходе а.з. для временных шагов 0,05 с, 0,025 с и 0,01 с.

Рисунок 7.6 – Временные зависимости температуры топлива и оболочки твэла для временных шагов 0,05 с, 0,025 с и 0,01 с.

Рисунок 7.7 – Временные зависимости реактивности для временных шагов 0,05 с, 0,025 с и 0,01 с.

Рисунок 7.8 – Сравнительные временные зависимости мощности и расхода СТ через а.з. для временных шагов 0,05 с, 0,025 с и 0,01 с.

Рисунок 7.9 – Временные зависимости уровня свинца в УПОС и расхода через а.з. для временных шагов 0,05 с, 0,025 с и 0,01 с.

Рисунок 7.10 – Временные зависимости суммарной мощности САОР для временных шагов 0,05 с, 0,025 с и 0,01 с.

Рисунок 7.11 – Временные зависимости температуры СТ на входе и выходе а.з. для аксиальных сеток с шагами 0,1 м, 0,05 м и 0,025 м.

Рисунок 7.12 – Временные зависимости температуры топлива и оболочки твэла для аксиальных сеток с шагами 0,1 м, 0,05 м и 0,025 м.

Рисунок 7.13 – Временные зависимости реактивности для аксиальных сеток с шагами 0,1 м, 0,05 м и 0,025 м.

Рисунок 7.14 – Временные зависимости мощности и расхода СТ через а.з. для аксиальных сеток с шагами 0,1 м, 0,05 м и 0,025 м.

Рисунок 7.15 – Временные зависимости уровня свинца в УПОС и расхода через а.з. для аксиальных сеток с шагами 0,1 м, 0,05 м и 0,025 м.

Рисунок 7.16 – Временные зависимости суммарной мощности САОР для аксиальных сеток с шагами 0,1 м, 0,05 м и 0,025 м.

Рисунок 7.17 – Временная зависимость положения стержней АР.

Рисунок 7.18 – Временные зависимости для относительной мощности а.з.

Рисунок 7.19 – Временные зависимости для температуры свинцового теплоносителя на выходе из а.з.

Рисунок 7.20 – Временные зависимости для температуры свинцового теплоносителя на входе в а.з.

Рисунок 7.21 – Временные зависимости для максимальной температуры топлива.

Рисунок 7.22 – Временные зависимости для максимальной температуры оболочки твэла.

Рисунок 7.23 – Временные зависимости для средней температуры топлива.

Рисунок 7.24 – Временные зависимости для температуры теплоносителя на выходе из ПГ.

Рисунок 7.25 – Временные зависимости для температуры теплоносителя на входе в ПГ.

Рисунок 7.26 – Временные зависимости для температуры теплоносителя на выходе из САОР.

Рисунок 7.27 – Временные зависимости для уровня СТ в УПОС.

Рисунок 7.28 – Давление в газовой полости реактора в расчётах с различными временными шагами.

Рисунок 7.29 – Массовый расход теплоносителя на входе в а.з. в расчётах с различными временными шагами.

Рисунок 7.30 – Распределение объёмного содержания пара в смеси «свинец-водяной пар» по высоте подъёмной части ПГ в расчётах с различными временными шагами.

Рисунок 7.31 – Распределение объёмного содержания пара в смеси «свинец-водяной пар» по высоте опускной части ПГ в расчётах с различными временными шагами.

Рисунок 7.32 – Давление в газовой полости реактора в расчётах с различными размерами расчётных ячеек.

Рисунок 7.33 – Массовый расход теплоносителя на входе в а.з. в расчётах с различными размерами расчётных ячеек.

Рисунок 7.34 – Распределение объёмного содержания пара в смеси «свинец-водяной пар» по высоте опускной части ПГ в расчётах с различными размерами расчётных ячеек.

Рисунок 7.35 – Давление в газовой полости реактор.

Рисунок 7.36 – Расход теплоносителя через ГЦН одной петли.

Рисунок 7.37 – Массовый расход теплоносителя на входе в а.з.

Рисунок 7.38 – Температура свинцового теплоносителя на входе в и выходе из а.з.

Рисунок 7.39 – Интегральная мощность реактора.

Рисунок 7.40 – Максимальная температура топлива.

Рисунок 7.41 – Распределение объёмного содержания пара в смеси «свинец-водяной пар» по высоте подъёмной части ПГ (отметка «0 м» соответствует месту истечения).

Рисунок 7.42 – Объёмное содержание пара в смеси «свинец-водяной пар» в нижней части ПГ (ниже места разрыва на 0,6 м).

Рисунок 7.43 – Распределение объёмного содержания пара в смеси «свинец-водяной пар» по высоте опускной части ПГ.

Рисунок 7.44 – Объёмное содержание пара в смеси «свинец-водяной пар» в трубопроводе подачи свинца на входе в аварийный модуль ПГ.

Рисунок 7.45 – Объёмное содержание пара в смеси «свинец-водяной пар» на входе в а.з.

Рисунок 7.46 – Объёмное содержание пара в смеси «свинец-водяной пар» на выходе из а.з.

Рисунок 7.47 – Нодализация схема а.з. РУ БН-1200.

Рисунок 7.48 – Картограмма зон гидравлического профилирования а.з. РУ БН-1200.

Рисунок 7.49 – Нодализация схема первого контура РУ БН-1200.

Рисунок 7.50 – Нодализация схема второго контура РУ БН-1200.

Рисунок 7.51 – Нодализация схема промежуточного контура САОТ.

Рисунок 7.52 – Нодализация схема ВТО.

Рисунок 7.53 – Картограмма нейтронно-физической модели активной зоны реактора БН-1200 в коде ЕВКЛИД/V1.

Рисунок 7.54 – Изменение температуры теплоносителя на выходе из а.з. для различных значений шага по времени.

Рисунок 7.55 – Изменение температуры оболочки твэла для различных значений шага по времени.

Рисунок 7.56 – Изменение температуры топлива для различных значений шага по времени.

Рисунок 7.57 – Изменение температуры теплоносителя на выходе из а.з. для различных аксиальных сеток.

Рисунок 7.58 – Изменение температуры оболочки твэла для различных аксиальных сеток.

Рисунок 7.59 – Изменение температуры топлива для различных аксиальных сеток.

Рисунок 7.60 – Изменение относительной мощности реактора во времени.

Рисунок 7.61 – Изменение температуры теплоносителя на выходе из а.з.

Рисунок 7.62 – Изменение температуры оболочки твэла во времени.

Рисунок 7.63 – Изменение температуры топлива во времени.

Рисунок 7.64 – Объем пара в а.з.