

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

Институт Энергетический  
Направление подготовки Теплоэнергетика и теплотехника  
Кафедра Теоретической и промышленной теплотехники

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

Тема работы
<b>Математическое моделирование процессов тепломассопереноса в реакторе на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем</b>

УДК 621.1.016.4:621.039.526

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ4Г	Ахметшина Гельфруз Салиховна		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Кузнецов Гений Владимирович	д.ф.-м.н.		

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры менеджмента	Попова С.Н.	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры ЭБЖ	Василевский М.В.	к.т.н.		

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Теоретической и промышленной теплотехники	Кузнецов Г.В.	д.ф.-м.н.		

Томск – 2016 г.

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ  
Направление подготовки (специальность) Теплоэнергетика и теплотехника  
Кафедра Теоретической и промышленной теплотехники

УТВЕРЖДАЮ:  
Зав. кафедрой ТПТ  
\_\_\_\_\_ Кузнецов Г.В. \_\_\_\_\_  
(Подпись) (Дата)

### ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группы	ФИО
5БМ4Г	Ахметшиной Гельфруз Салиховне

Тема работы:

**Математическое моделирование процессов тепломассопереноса в реакторе на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем**

Утверждена приказом директора (дата, номер)

№10155/с от 28.12.2015

Срок сдачи студентом выполненной работы:

01.06.2016 г.

### ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

#### Исходные данные к работе

*(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).*

Объектом исследования является: тепловыделяющая сборка активной зоны реактора мощностью 1,5МВт. Данные о конструкторских материалах и теплоносителе. Режим работы при нормальной эксплуатации и при снижении расхода теплоносителя.

<p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b>  <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<p>Анализ влияния возможных изменений условий работы реактора на характеристики системы безопасности.          Численное исследование процесса тепломассопереноса в активной зоне ядерного реактора с жидкометаллическим теплоносителем.          Анализ полученных результатов численного исследования процесса тепломассопереноса активной зоне ядерного реактора с жидкометаллическим теплоносителем.</p>
<p><b>Перечень графического материала</b>  <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<p>Презентация (21 слайд)</p>

<p><b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b>  <i>(с указанием разделов)</i></p>	
<p><b>Раздел</b></p>	<p><b>Консультант</b></p>
<p>«Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»</p>	<p><b>Попова Светлана Николаевна</b></p>
<p>«Социальная ответственность»</p>	<p><b>Василевский Михаил Викторович</b></p>
<p>«Раздел на английском языке»</p>	<p><b>Буран Анна Леонидовна</b></p>
<p><b>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</b></p>	
<p>Введение</p>	
<p>Аварийные ситуации, рассматриваемые при проектировании реакторов на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем</p>	
<p>Численное исследование процесса тепломассопереноса в активной зоне реактора с целью обоснования его безопасности</p>	
<p>Заключение</p>	
<p>Список используемой литературы</p>	

<p><b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b></p>	<p>23.09.2014г.</p>
--	---------------------

**Задание выдал руководитель:**

<p><b>Должность</b></p>	<p><b>ФИО</b></p>	<p><b>Ученая степень, звание</b></p>	<p><b>Подпись</b></p>	<p><b>Дата</b></p>
<p>Профессор</p>	<p>Кузнецов Гений Владимирович</p>	<p>д.ф-м.н.</p>		

**Задание принял к исполнению студент:**

<p><b>Группа</b></p>	<p><b>ФИО</b></p>	<p><b>Подпись</b></p>	<p><b>Дата</b></p>
<p>5БМ4Г</p>	<p>Ахметшина Гельфруз Салиховна</p>		

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа включает 144 страницы, 21 рисунок, 15 таблиц, 80 источников, 1 приложение.

Ключевые слова: численное исследование, тепломассоперенос, тепловыделяющая сборка, уравнение энергии, физические свойства.

Объектом исследования является тепловыделяющая сборка с жидкометаллическим теплоносителем.

Целью работы является анализ условий возникновения критических режимов разогрева в активной зоне ядерного реактора.

В процессе исследования проводилось численное моделирование процессов тепломассопереноса в реакторе на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем при тяжелой аварии.

В результате исследования получены тепло- и массообменные параметры, характеризующие состояние энергетической установки при тяжелой аварии. Полученные результаты могут быть использованы в качестве производственных оценок при проектировании АЭС и ведении расчетно-конструкторских работ.

Область применения: разработка и обоснование безопасности реакторных установок, проектирование АЭС.

Выпускная квалификационная работа выполнена в текстовом редакторе Microsoft Word 2010, и редакторе формул Math Type, для расчетов и выполнения графиков использовалась программы ANSYS Fluent 14.0, Origin Pro9.1.

## Содержание

Введение.....	11
1 Современное состояние моделирования процессов тепломассопереноса в активной зоне ядерного реактора.....	16
1.1 Методы исследования и программные коды .....	18
1.2 Общие сведения о жидкометаллических теплоносителях.....	21
1.2.1 Характеристики жидкометаллических теплоносителей .....	27
1.2.2 Перспективы использования жидкометаллических теплоносителей.....	36
1.3 Общие сведения о быстром реакторе со свинцово-висмутовым теплоносителем .....	41
1.4 Аварийные ситуации, рассматриваемые при проектировании реакторов на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем .....	43
2 Описание программного комплекса ANSYS Fluent .....	48
2.1 Рабочая среда ANSYS Fluent.....	48
2.2 Сеточный генератор GAMBIT .....	51
2.3 Алгоритм решения задачи в программном комплексе ANSYS Fluent.....	52
3 Численное исследование процесса тепломассопереноса в активной зоне реактора.....	56
3.1 Постановка задачи.....	56
3.2 Результаты численного исследования тепломассопереноса в активной зоне быстрого реактора со свинцово-висмутовым теплоносителем при нормальной эксплуатации.....	64
3.3 Результаты численного исследования тепломассопереноса в активной зоне быстрого реактора со свинцово-висмутовым теплоносителем при снижении расхода теплоносителя .....	67
3.4 Выводы .....	74
4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение....	76
4.1 Оценка инновационного потенциала НИР .....	76
4.2 Определение этапов работы, трудоемкости работы, составление плана-графика .....	78
4.3 Составление сметы затрат .....	83
4.4 Расчет нарастания технической готовности работ .....	89
5 Социальная ответственность .....	92
Введение.....	92
5.1 Профессиональная социальная безопасность .....	93
5.1.1 Анализ вредных факторов, которые могут возникнуть при эксплуатации объекта исследования .....	93
5.1.2 Анализ вредных факторов, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований.....	95
5.1.2.1 Воздействие электромагнитного поля на оператора ПЭВМ .....	95
5.1.2.2 Освещение.....	99
5.1.2.3 Микроклимат помещения.....	100
5.1.2.4 Источники шума .....	102

5.2 Анализ выявленных опасных факторов проектируемой производственной среды .....	102
5.2.1 Электробезопасность при работе на ПЭВМ.....	102
5.2.2 Пожарная безопасность .....	104
5.2.3 Безопасность при проектировании .....	106
5.3 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности .....	107
5.4 Выводы .....	108
Заключение .....	110
Список публикаций.....	111
Список используемых источников.....	112
Приложение А .....	122

## Введение

Соответственно опубликованным прогнозам развития мирового сообщества, на период до 2050 года потребность в электроэнергии возрастет примерно в 4,7 раза, а глобальное использование первичной энергии примерно в 2,5 раза [1,2]. Большинство прогнозов развития предсказывает важнейшее и стабильное расширение потребления ядерной энергии. Сегодня почти весь всемирный парк ядерных энергоблоков состоит из реакторов на тепловых нейтронах, охлаждаемых водой. Это реакторы второго поколения типа PWR, BWR, Candu, а также проекты Российской Федерации - ВВЭР и РБМК. Страны, где сформирована ядерная энергетика, встали на путь усовершенствования действующих энергоблоков (второе поколение) и строительства в этот переходной этап АЭС по разработанным проектам третьего поколения после Чернобыля. Эти энергоблоки (EPR, AP-1000, ABWR, АЭС-2006) соответствуют имеющимся требованиям и стандартам безопасности и экологии, решая при этом, современные энергетические проблемы. К сожалению, они не отвечают полностью сформулированным условиям, в первую очередь, по топливообеспечению, экономике, защите от нераспространения ядерных материалов. Заменить их необходимо новыми реакторами и технологиями ядерного топливного цикла, что даст возможность постепенного перехода к конкурентоспособному и безопасному энергопроизводству с обширной ресурсной базой, основанной на собственной наработке делящихся изотопов [3].

Мировая потребность в электроэнергии в ближайшие 50-100 лет может быть удовлетворена посредством реакторов нового IV поколения, свободных от несовершенства своих предшественников, и которые будут оснащены неограниченными сырьевыми запасами собственной наработки. Работа над ними началась и ведется в пределах интернациональных проектов Поколение IV и ИНПРО, участником которых является и Российская Федерация [4].

Согласно инициативе президента Российской Федерации В.В. Путина, выдвинутой на Саммите тысячелетия в ООН 6 сентября 2000 года, предусмотрено поэтапное снижение объемов применения в мирной ядерной энергетике обогащенного урана. В планах есть и разработка нового поколения реакторов на быстрых нейтронах, на которых будет возложена главная роль в развитии крупномасштабной ядерной энергетике [5].

К разработкам реакторов нового поколения предъявлены повышенные требования по экономическим показателям, воспроизводству ядерного топлива и безопасности ядерной энергетической установки [6].

Актуальность работы. Современный этап развития атомной энергетике неразрывно связан с совершенствованием атомных электростанций (АЭС) с целью улучшения их экономических и эксплуатационных характеристик, а также повышения безопасности. Разработка реакторов на быстрых нейтронах (РБН) Российской Федерации предполагает три объекта исследования: реактор со свинцовым теплоносителем, реактор со свинцово-висмутовым теплоносителем, реактор с натриевым теплоносителем [7].

Свинцово-висмутовые реакторные установки имеют высокую степень пассивной безопасности и внутренней самозащищенности, обладают простотой конструкции, возможностью эксплуатации на разных типах топлива, компактностью и максимальной заводской готовностью реакторной установки [8].

Проекты атомных электростанций с быстрыми реакторами со свинцовым и свинцово-висмутовым теплоносителем, ориентированные на организацию региональных источников электрической энергии разного предназначения и мощности, которые размещаются в энергопотребительных центрах, являются наиболее перспективными для энергосистемы страны и развития экономики малых городов [8].

Несмотря на вышеперечисленные преимущества, обоснование безопасности остается главной задачей при проектировании реакторных установок, что приводит к ужесточению соответствующих требований. Результатом этого является повышение требований качества расчетного анализа нарушений нормальной эксплуатации, проектных и запроектных аварий, определение последствий которых является одной из главных задач при обосновании безопасности реакторной установки [9].

Разработка и обоснование систем безопасности требует проведения значительного комплекса теплофизических исследований ядерных энергетических установок, включая создание экспериментальных моделей, проведение численных исследований, разработку и совершенствование методов численного моделирования [10].

Анализируя безопасность быстрого реактора, важным является исследование последствий тяжелых аварий. Расчет аварий с одновременным отказом систем безопасности, в результате которой возможно снижение расхода теплоносителя, что в свою очередь приведет к разогреву активной зоны с вскипанием теплоносителя, необходим при обосновании безопасности реакторной установки.

Моделирование процессов тепломассопереноса в активной зоне РБН является актуальной задачей, обусловленной строгими требованиями по безопасности работающих и строящихся атомных электростанций с реакторами на быстрых нейтронах, и также при создании установок нового поколения.

Цель работы состоит в проведении анализа условий возникновения критических режимов разогрева в активной зоне ядерного реактора (АЗ ЯР).

Основными задачами исследования являются:

1. Анализ влияния возможных изменений условий работы реактора на характеристики системы безопасности.
2. Численное исследование процесса тепломассопереноса в АЗ ЯР с жидкометаллическим теплоносителем.
3. Анализ полученных результатов численного исследования процесса тепломассопереноса в АЗ ЯР с жидкометаллическим теплоносителем.

Научная новизна работы заключается в проведении численного исследования процессов тепломассопереноса в активной зоне реактора на быстрых нейтронах со свинцово-висмутовым теплоносителем.

Практическая значимость работы заключается в том, что проведенные исследования позволяют использовать данный подход для создания расчетных методик предварительной оценки характеристик протекания аварийных процессов в активной зоне быстрого реактора со свинцово-висмутовым теплоносителем.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертации докладывались и обсуждались следующих конференциях:

- 5-я Всероссийская научная конференция с международным участием «Теплофизические основы энергетических технологий», ТПУ, г.Томск 2015;
- 5-я Международная молодежная научная конференция «Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики - 2015», ТГУ, г. Томск, 2015;
- 11-я Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия - 2016», ИГЭУ, г.Иваново, 2016;

Публикации. Основные результаты диссертации в виде тезисов размещены на сайте конференций и приняты для опубликования в сборнике трудов вышеназванных конференций.

Содержание работы.

Первая глава отражает современные тенденции в области моделирования процессов тепломассопереноса в активной зоне реакторных установок. Рассмотрены методы исследования и программные коды. Изложены характеристики жидкометаллических теплоносителей, а также перспективы их использования. Проанализированы аварийные ситуации при проектировании реакторов с жидкометаллическим охлаждением.

Вторая глава посвящена описанию программного комплекса ANSYS Fluent.

В третьей главе приведены результаты численных исследований течения жидкометаллического теплоносителя в тракте охлаждения быстрого реактора.

В заключении подведены основные итоги проведенных исследований.

## **1 Современное состояние моделирования процессов теплопереноса в активной зоне ядерного реактора**

Современный этап развития атомной энергетики неразрывно связан с совершенствованием атомных электростанций (АЭС) с целью улучшения их экономических и эксплуатационных характеристик, а также повышения безопасности. Разработка и обоснование систем безопасности требует проведения значительного комплекса теплофизических исследований ядерных энергетических установок, включая создание экспериментальных моделей, проведение экспериментальных исследований, разработку и совершенствование методов численного моделирования [7].

Так, например, в работе [11] представлена математическая модель, расчетная методика и на базе ее разработана вычислительная программа ТЕМПА-1Ф для анализа процессов теплопереноса в пучках твэлов реакторов типа ВВЭР при нарушениях эксплуатации и авариях. В данной работе показано влияние в геометрии каналов и граничных условиях на результаты экспериментов по исследованию турбулентного перемешивания теплоносителя в смежных каналах.

В работе [9] впервые разработана методика расчёта процессов кипения натрия, учитывающая распределенность параметров двухфазного потока в реакторе в целом и по сечению отдельной ТВС. Разработана методика трёхмерного расчёта теплогидравлических процессов в ТВС быстрого реактора при разгерметизации твэла и выходе газа в натрий.

В работе [6] осуществлен численный анализ условий теплообмена и устойчивости циркуляции при кипении расплавленного металла при малых скоростях циркуляции в системе параллельных тепловыделяющих сборок твэлов и охлаждения активной зоны реактора на быстрых нейтронах. В результате исследования создан код SAT для моделирования нестационарных

процессов в двухфазных жидкометаллических потоках ТВС и циркуляционных контурах.

В работе [12] результатом разработанного эффективного метода моделирования для описания трехмерных процессов гидродинамики и теплообмена в активной зоне ВВЭР стало создание программного комплекса ТРЕТОН.

В работе [13] представлена уточненная математическая модель анизотропного пористого тела для решения инженерных задач расчета теплогидравлических процессов в активной зоне современных перспективных реакторов типа БРЕСТ, позволяющая исследовать трехмерное нестационарное течение однофазного теплоносителя в активных зонах из бесчехловых ТВС. Результатом представленной математической модели стала разработка методики расчета и трехмерного компьютерного кода ТНЕНУСО-3Dt.

В работе [14] на основе математической модели удержания расплава в корпусе реактора представленной в [15], разработанная расчетная модель реализована в виде кода БРУТ. Программа позволяет определить вероятность выхода расплава на днище корпуса и взаимодействия расплава с корпусом реактора. Согласно результатам расчета при рассмотренных в данной работе авариях расплавленное топливо удерживается в корпусе реактора, не разрушая его.

В работе [16] выполнено исследование применимости коммерческих CFD-кодов для моделирования процесса в жидкометаллическом теплоносителе. Решение задачи течения натриевого теплоносителя в круглой трубе по кодам ANSYS CFX, STAR-CCM+, FlowVision, где используется аналогия Рейнольдса, дает существенное отклонение от аналитического решения, как по температуре, так и по критерию Нуссельта. Учёт специфики теплопереноса для натриевого теплоносителя, с помощью специально разработанной модели

LMS, позволяет существенно улучшить результаты расчётов для данного класса задач.

С развитием вычислительных технологий стало возможным затратные физические исследования дополнять математическим моделированием. Численное исследование является менее затратным, также с помощью него можно получить дополнительную подробную информацию. В последние годы инструментами для решения таких задач используются программные комплексы ANSYS Fluent [17], OpenFOAM [18], STAR-CD [19] и другие.

### **1.1 Методы исследования и программные коды**

Энергия деления ядер представляет собой на данный момент перспективный источник энергии. Но ее использование обусловлено повышенными требованиями к безопасности. Это оказывается достижимым посредством разработок компьютерных кодов для моделирования физических процессов в реакторных установках и анализа безопасности АЭС. Как известно научно-технический прогресс не стоит на месте, появляются методы, программные коды, которые помогают сократить затраты времени и труда на проектирование. Одним из таких является Computational Fluid Dynamics (CFD код) – метод вычислительной гидродинамики, с помощью которого возможна визуализация процессов, протекающих в энергетической установке, выявление областей, подверженных термо – и прочим нагрузкам. Данный метод делает возможным принятие мер для выявления и предотвращения недостатков еще на этапе разработок, улучшить конструкцию до ее изготовления [20].

Так, например, сотрудники Красноярского филиала Института теплофизики СО РАН разработали многоцелевой CFD-код – Sigma Flow. Помимо современных RANS-моделей турбулентности и подсеточной модели Смагоринского для LES-моделирования, пакет содержит модели многофазных течений, модели кинетики горения для предварительно перемешанных и диффузионных пламен, горения угольных частиц, теплообмена излучением. По

большой части, код применяется как для моделирования течений в промышленных аппаратах и устройствах со сложной геометрией, так и для сопровождения и дополнения экспериментальных исследований [20].

VP2/3 является CFD-кодом гидродинамического и теплофизического профиля, базирующимся на оригинальных многоблочных вычислительных технологиях (МВТ) на основе использования разномасштабных пересекающихся структурированных сеток для решения осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса и энергии для несжимаемой жидкости и вязкого газа, прошедших широкий спектр тестирований на классических задачах из баз данных ERCOFTAC и специальных экспериментов, выполненных на установках НИИ механики МГУ, Санкт-Петербургский государственный политехнический университет Петра Великого, CIRA (Италия), университета Саутгемптона (Англия) и др. В коде значительное внимание уделено полуэмпирическим дифференциальным моделям турбулентности. Код в основном предназначен для численного анализа вихревой интенсификации теплообмена и управления обтеканием тел с вихревыми ячейками, а также применения МВТ для решения прикладных задач [20].

В Институте проблем безопасного развития Атомной энергии Российской Академии наук (ИБРАЭ РАН) разработаны коды нового поколения, которые характеризуются следующими особенностями [21]:

- мультифизичность;
- возможность детальных трехмерных расчетов;
- применение современных физических моделей, которые основаны на новейших теоретических и экспериментальных данных;
- современная архитектура, позволяющая организовывать обмен данными между разнородными программными модулями и объединять их для решения различных задач;
- современные численные алгоритмы решения задач;

- применение высокоэффективных алгоритмов параллельных вычислений;
- наличие современных систем ввода-вывода, обработки, визуализации данных и результатов расчетов.

Одной из таких разработок является интегральный код СОКРАТ-БН, предназначенный для расчетного обоснования безопасности реакторов с натриевым теплоносителем. Областью применения кода является моделирование динамики реакторов с натриевым теплоносителем в условиях аварий, которые связаны с нарушением работы оборудования I-го, II-го и III-го контуров, включая начальные стадии развития аварии и стадию деградации активной зоны [21].

Универсальный топливный код БЕРКУТ предназначен для численного моделирования термомеханического и физико-химического поведения отдельного ТВЭЛА с разными видами топлива в активной зоне реактора на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем. Применяется в обоснование безопасности ТВЭЛОВ активной зоны реакторов с жидкометаллическим теплоносителем.

Интегральный расчетный код ЕВКЛИД предназначен для детерминистического анализа аварий реакторов с жидкометаллическим теплоносителем в различных режимах работы с учетом всех факторов, которые оказывают влияние на безопасность реакторной установки, в том числе нагрев теплоносителя, разгерметизация оболочки ТВЭЛА, плавление активной зоны, распространение продуктов деления под защитной оболочкой и за ее пределы в окружающую среду [21].

ЛОГОС – это CFD-код, направленный на имитационное моделирование сложных инженерных систем. ЛОГОС предназначен для решения задач тепломассопереноса на супер-ЭВМ с массовым параллелизмом. С помощью данной программы моделируются такие физические процессы как: стационарные и нестационарные течения; течения несжимаемых, слабосжимаемых (плотность зависит от температуры) и сжимаемых сред;

ламинарные и турбулентные течения; течения в пористых средах; течения со свободной поверхностью; распространение тепла в различных средах; конвективный теплообмен; сопряженный теплообмен; теплообмен излучением; многокомпонентные течения; многофазные течения. Пакет программ инженерного анализа ЛОГОС ориентирован на моделирование широкого круга физических процессов в интересах проектирования перспективных наукоемких изделий промышленности. В настоящее время пакет ЛОГОС проходит всестороннюю верификацию на прикладных задачах атомной энергетики с использованием экспериментальной базы предприятий отрасли с целью подготовки верификационного отчета для подачи пакета программ ЛОГОС на аттестацию в РОСТЕХНАДЗОРЕ [20].

CONV2D/CONV3 – пакет двумерных и трехмерных теплогидродинамических расчетных кодов, предназначенный для прямого численного моделирования процессов тепломассопереноса при анализе тяжелых аварий. Пакет разработан в ИБРАЭ РАН [21].

ANSYS FLUENT – это основной продукт, предназначенный для решения для задач гидрогазодинамики общего назначения, которые предлагает компания ANSYS, Inc [20]. Модуль основан на методе контрольных объемов, который характеризуется высокой точностью, и использующий решатель по давлению, что дает возможность его применения в решении широкого круга инженерных задач.

## **1.2 Общие сведения о жидкометаллических теплоносителях**

Современная ядерная энергетика переживает не самый простой период. Любой технологии, претерпевающей критику в своем становлении, необходимо находиться в постоянном совершенствовании. Причиной этому являются: потенциальная опасность аварий, наносящая ущерб, как экологии, так и экономике, скопление радиоактивных и долгоживущих отходов. Рассматривая глобальную роль ядерной энергетике в мировой энергосистеме, целесообразно

сделать акцент на основной проблеме – экологическая безопасность. Решить эту проблему в значительной мере помогает использование жидкометаллических теплоносителей в ядерных реакторах [22].

Особое место среди известных теплоносителей занимают жидкие металлы, имеющие относительно высокую теплопроводность, малую вязкость и другие подходящие физические свойства. Низкое давление пара при высоких температурах позволяет использовать многие металлы в качестве теплоносителей, в особо напряженных условиях при температурах 700 - 800°C, когда все другие вещества (вода, органические соединения) непригодны. Исключение, может быть, составляют солевые системы.

В качестве теплоносителей используют металлический литий, натрий, калий, ртуть, олово, сплавы натрия с калием и свинца с оловом и висмутом, имеющие низкие температуры плавления и другие важные физические свойства. Могут найти применений цезий, рубидий, галлий и индий. Особый интерес для ядерной техники представляют щелочные металлы (литий, натрий, калий и сплавы натрия с калием) [23].

**Реактор с жидкометаллическим теплоносителем (ЖМТ)** — ядерный реактор, для которого применим жидкий металл как теплоноситель.

Впервые проекты с ЖМТ появились в 1950-х годах, разработки проводились в Советском Союзе и Соединенных штатах. В СССР работа велась в Физико-энергетическом институте, под руководством академика Академии наук Украинской ССР А.И.Лейпунского. На практике реактор нашел применение на опытной подводной лодке К-27.

Причиной выбора данного реактора явились его компактность, быстрый набор мощности, которая необходима для маневрирования в боевых условиях, а также повышенная потенциальная безопасность реактора[24].

Турбулентное течение жидкостей в трубах сопровождается передачей тепла, осуществляемым посредством турбулентного перемешивания потока, а

также молекулярной теплопроводности теплоносителя. Жидкометаллическим теплоносителям присуща отличительная молекулярная теплопроводность, что отличает их от других теплоносителей. Это является определяющим фактором в доле тепла, которое переносится за счет теплопроводности, обеспечивая наилучшие теплопередающие свойства расплавленных металлов, и находит им широкое применение в качестве теплоносителей.

Расплавленные металлы это единственные теплоносители, которые обладая хорошими ядерными свойствами, отвечают требованиям относительно теплоотвода, что предъявляют к реакторам на быстрых нейтронах, и реакторам-размножителям.

В таблице 1.2.1 приведены теплофизические свойства жидких металлов, которые применимы в технике реакторостроения.

Таблица 1.2.1 – Теплофизические свойства жидких металлов [25]

Металлы	T, К	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$c_p$ , кДж/кг <sup>°C</sup>	$\lambda$ , Вт/м <sup>°C</sup>	$a, 10^{-5}$ м <sup>2</sup> /сек	$\nu, 10^{-7}$ м <sup>2</sup> /сек	$Pr, 10^{-2}$
Литий	86	-	2,269	-	-	-	-
	295	534	3,282	71	-	-	-
	373	521	3,789	70	-	-	-
	473	507	4,145	46	2,16	11,1	5,14
	573	505	4,237	47	2,18	9,3	4,25
	673	495	4,329	47	2,20	8,2	3,72
	773	484	4,421	47	2,22	7,3	3,30
	1073	462	4,572	48	2,27	5,8	2,55
Натрий	220	989	1,180	143	-	-	-
	300	967	1,230	133	-	-	-
	400	920	1,373	84	6,66	6,6	0,99
	600	874	1,298	75	6,60	4,1	0,7
	800	827	1,256	65	6,30	2,8	0,44
	1000	778	1,269	55	5,83	2,3	0,40
	1200	740	1,310	43	4,86	2,1	0,43
	Свинец	293	11,34	0,125	34,89	-	-
373		11,15	0,126	33,38	-	-	-
573		10,68	0,127	28,14	-	-	-
723		10,54	0,147	15,35	0,99	1,99	0,435
823		10,42	0,147	15,58	1,01	1,63	0,428
923		10,30	0,147	16,75	1,10	1,45	0,420
1073		10,13	0,147	19,77	1,33	1,25	0,410
Свинец-висмут (55,5% Вi – 44,5% Рb)		403	$10,57 \cdot 10^3$	0,147	10,9	0,71	3,14
	523	$10,43 \cdot 10^3$	0,147	12,2	0,8	2,10	2,62
	623	$10,3 \cdot 10^3$	0,147	13,1	0,87	1,71	1,97
	723	$10,18 \cdot 10^3$	0,147	14,2	0,95	1,46	1,54
	823	$10,06 \cdot 10^3$	0,147	15,2	1,03	1,29	1,25
	923	$9,94 \cdot 10^3$	0,147	16,3	1,12	1,18	1,06
	973	$9,88 \cdot 10^3$	0,147	16,7	1,16	1,14	0,99
	Натрий-калий (78% К – 22% Na)	280	875	0,948	21,05	2,36	8,96
370		848	0,942	22,91	2,86	6,24	2,18
500		817	0,900	25,00	3,45	4,20	1,22
700		768	0,879	26,23	3,89	3,00	0,77
800		746	0,879	26,17	4,03	2,72	0,68
950		709	0,883	25,64	4,09	2,42	0,59
1200		650	0,913	23,96	3,83	2,22	0,8
Ртуть		100	$14,6 \cdot 10^3$	0,141	48	-	-
	250	$13,72 \cdot 10^3$	0,134	6,8	-	-	-
	400	$13,28 \cdot 10^3$	0,137	9,3	0,502	0,88	1,74
	600	$12,83 \cdot 10^3$	0,137	12,4	0,684	0,68	-
	800	$12,44 \cdot 10^3$	0,136	14,2	0,795	0,62	-
	1000	$11,83 \cdot 10^3$	0,136	16	0,89	0,59	-
	1100	$11,52 \cdot 10^3$	0,136	16,8	0,938	0,58	-

**Достоинства жидкометаллических теплоносителей [26, 27]:**

1. Жидкие металлы обладают малой упругостью паров. Давление в системе, определяемое потерей напора в контуре, обычно меньше 7 атм. В свою очередь, низкое давление определяет простоту конструкции и эксплуатацию реактора, а также и вспомогательного оборудования станции.
2. Большая гибкость в работе жидких металлов обусловлена присущей им высокой температурой кипения. Например, при повышении температуры теплоносителя на выходе из первого контура тепловыделяющие элементы не расплавятся вследствие ухудшения теплоотдачи из-за образования пленки пара, что вероятно для реакторов, охлаждаемых водой.
3. Использование герметизированных электронасосов (постоянного и переменного тока) обусловлено высокой электропроводностью жидких щелочных металлов. Относительно расхода энергии на прокачивание, расплавленные металлы немного отстают от воды. Из жидких металлов щелочные металлы обладают лучшими характеристиками по расходу энергии на прокачивание. К примеру, если расход энергии на прокачивание жидкого натрия принять за единицу, то для ртути это будет 2,8, а для висмута 4,8.
4. Отличительным свойством Na и Na—K является малое коррозионное и эрозионное воздействие на материалы конструкции. Многие из обычных металлов применимы к натрию и сплаву Na—K.
5. По дешевизне натрия уступает свинцу, а затем калию. Расходы на теплоноситель являются незначительными, так как объем теплопередающей системы относительно небольшой, и перезарядка производится не часто.

#### **Недостатки жидкометаллических теплоносителей [26, 27]:**

1. Щелочным металлам свойственна большая химическая активность. Наиболее опасной является взаимодействие с водой. В связи с этим в

системах с пароводяными циклами необходимым является предусмотрительность устройств, обеспечивающих взрывобезопасность. Взаимодействие с паром, либо кислородом воздуха является неопасным (поддерживающейся реакции горения нет), но во избежание окисления металла, его взаимодействие с воздухом не должно происходить. Так как окись натрия не растворима в жидком натрии и Na—K, а включение окислов не исключает закупорку отдельных каналов. Окислы натрия, находясь в жидком натрии и Na—K приводят к ухудшению коррозионных свойств теплоносителя. Na и Na—K необходимо хранить в среде инертного газа (гелий, аргон), но применение инертного газа – гелия пока является невозможным, обусловленной его текучестью.

2. Установка биологической защиты для наружной части контура теплопередающей системы вызвана активацией теплоносителя. Решить эту проблему является сложным для  $\gamma$ -излучения высокой энергии или при тормозном излучении. Отмеченное выше приводит к предъявлению повышенных требований к химической чистоте жидких металлов.
3. Дополнительное оборудование, применение которого является необходимым из-за использования ЖМТ, приводит к усложнению технологической схемы ядерно-энергетической установки. Таким дополнительным оборудованием являются:
  - 1) установка для плавления и перекачивания жидкого металла в контур;
  - 2) устройство для удаления окислов. Через это устройство, которое параллельно включено в контур, установлен небольшой расход жидкого металла; таким образом, здесь теплоноситель постоянно очищается от окислов;
  - 3) ловушки для паров расплавленного металла, которые уносит газовый поток из системы при её опорожнении и заполнении.

Конструкция реактора определяется и выбором теплоносителя, от этого и зависит безопасность и эффективность установки. Но, к сожалению, нет теплоносителя, который удовлетворял бы всем требованиям. Например, для

воды необходимо высокое давление, а натрий окисляется с выделением температуры, в свинцово-висмутовой эвтектике образуется полоний, свинец плавится при высокой температуре. Но каждому характерны достоинства и недостатки.

### **1.2.1 Характеристики жидкометаллических теплоносителей**

#### **От ртути до натрия**

Жидкие металлы из-за своих физико-химических характеристик оказались очень перспективными в плане использования в реакторах на быстрых нейтронах. Именно поэтому в середине прошлого века изучением их свойств занялись ученые по обе стороны океана. Но сначала физики заинтересовались ртутью.

В 1946 году в Соединенных Штатах был запущен первый быстрый реактор с ртутным теплоносителем Clementine. Спустя несколько лет после пуска американского Clementine в Обнинске заработал реактор БР-2 мощностью 100 кВт на ртутном теплоносителе (его предшественник БР-1 охлаждался с помощью воздуха). Но проработать на этом металле удалось менее года. Практика продемонстрировала его неперспективность. Физические свойства ртути изучены достаточно хорошо [28].

Ртуть плавится при  $-38,87\text{ }^{\circ}\text{C}$  и кипит при  $357\text{ }^{\circ}\text{C}$ , имея теплоту плавления  $11,93\text{ кДж/кг}$  и теплоту испарения  $293\text{ кДж/кг}$ . Увеличение объема при плавлении составляет  $3,6\%$  [24,29].

Обширные исследования коррозионного воздействия ртути на конструкционные материалы проводились в связи с использованием ртутно-водяных установок в энергетике.

Стали углеродистые и легированные при кратковременном воздействии на них ртути не подвергаются коррозии. Однако длительные испытания крупных установок показали, что в относительно холодных участках системы

на внутренних стенках труб из углеродистой стали постепенно накапливается осадок из кристаллического железа и его окиси [29].

В 1959 году в Физико – Энергетическом институте (ФЭИ) был запущен реактор БР-5, теплоносителем первого контура которого являлся натрий, а второго – натрий-калий (в то же время исследования свойств этих теплоносителей шли во Франции, Германии и Японии). Начались широкомасштабные исследования различных типов теплоносителя: ртути, натрия, лития, эвтектических сплавов натрия-калия и свинца-висмута.

Но в итоге остановились на натрии. Так появился реактор на быстрых нейтронах, мощностью 350 МВт (БН-350) в Казахстане (сейчас остановлен), а потом БН-600 – единственный в мире действующий промышленный реактор на быстрых нейтронах. Параллельно с натрием изучались свойства свинца и сплава свинца-висмута на предмет применения в энергетических установках стратегических подводных лодок. В результате несколько поколений судовых реакторов получили свинцово-висмутовый теплоноситель [28].

### **Основные свойства натрия как теплоносителя**

К теплоносителю любой реакторной установки предъявляются следующие требования: он должен обеспечивать удовлетворительный теплосъем с активной зоны реактора, иметь высокую температуру кипения, высокий коэффициент теплопередачи, низкую коррозионную активность, совместимость с топливом и конструкционными материалами. Кроме того, теплоноситель должен иметь низкую стоимость, наведенную активность, температуру плавления, быть пожаро - и взрывобезопасным.

Поэтому для реакторов различных типов в зависимости от конкретных требований в качестве теплоносителя используют воду, органические жидкости, газы и т.п. Для быстрых реакторов применяют вещества с низкими сечениями замедления поглощения нейтронов: натрий, водяной пар, гелий, диссоциирующий газ. Наибольшее распространение получил натрий [30].

Сегодня это, пожалуй, базовый теплоноситель для быстрых реакторов. На Белоярской АЭС работает энергоблок с реактором БН-600, там же строится усовершенствованный и более мощный БН-800 (главный конструктор – Опытное Конструкторское Бюро Машиностроения им. Африкантова).

Почему именно натрий? Прежде всего из-за теплофизических характеристик. Натрий находится в широком диапазоне жидкого состояния при низких для металлов температурах. Он плавится при 97,8 °С, превращаясь в серебристо-белую жидкость, но обычно в активную зону он подается при температуре около 300 °С (температура на выходе – 500 °С) и кипит при 883 °С, образуя пары голубого цвета. Теплота плавления Na составляет 112 кДж/кг, теплота испарения 4345 кДж/кг. Объем натрия в процессе плавления при атмосферном давлении увеличивается на 2,71% [25,29,30].

Но особенно важно, что, не беспокоясь за вскипание теплоносителя, корпус реактора можно разработать на атмосферное давление (в реакторах типа водо-водяных энергетических реакторов (далее ВВЭР) давление довольно высокое). А это дает существенную экономию материалов при проектировании активной зоны и трубопроводов. Для быстрых энергетических реакторов корпуса имеют толщину всего несколько сантиметров [28].

Натрий представляет собой серебристо-белый металл, который быстро тускнеет на воздухе, взаимодействуя с водяными парами и кислородом, покрываясь слоем окиси и гидрата окиси. Он настолько мягок и пластичен, что при обычной температуре легко режется ножом и с помощью подручных приспособлений из него может быть протянута проволока или лента. Натрий относительно легкий металл, и его гидравлическое сопротивление невелико. Плотность его меньше плотности воды. Очень важное достоинство – хорошая совместимость со многими сталями, которые применяются в реакторостроении [29].

В общем, это был бы почти идеальный теплоноситель, если бы не окислялся с выделением температуры при соприкосновении с воздухом и водой. А значит, понадобятся технические и конструкторские меры, чтобы избежать пожаров. Еще один минус – в России натрий необходимого качества просто не выпускается, закупать его планируется во Франции или Китае[28].

Основные свойства натрия, которые делают его предпочтительным теплоносителем, - небольшие сечения поглощения и рассеяния нейтронов, высокие температура кипения, скрытая теплота парообразования и коэффициент теплопередачи, коррозионная пассивность по отношению к нержавеющей стали, топливу, высокие теплостойкость и температура замедления. Последнее позволяет проводить работы на участках с замороженным теплоносителем. Натрий имеет высокую термическую стойкость, низкую вязкость при рабочих температурах и для его прокачки можно применять надежные, не имеющие движущихся частей электромагнитные насосы [30].

Основные недостатки натриевого теплоносителя: его высокая химическая активность по отношению к воде, воздуху, пожароопасность, высокая наведенная радиоактивность.

К недостаткам применения жидкого натрия относится то, что он может проникать в поры графита. Присутствие значительного количества балластного натрия в порах могло привести к значительным потерям нейтронов из-за относительно большого сечения захвата нейтронов натрием. Чтобы предотвратить контакт натрия с графитом, последний защищают металлической фольгой (например, из циркония), который слабо поглощает нейтроны [31].

Коррозионное воздействие натрия на материалы по сравнению с другими жидкометаллическими теплоносителями (Li, Ga, Hg, Sn, Pb, Bi) является минимальным. Однако оно резко увеличивается при содержаниях

кислорода в жидком металле, больших 0,01-0,02%, и в условиях значительных температурных перепадов в системе [29].

### **Свинец. Преимущества и недостатки**

Свинец плавится при температуре 327,5°C, кипит при температуре 1750 °С. Теплота плавления 24,3 кДж/кг. Увеличение объема свинца при плавлении равно 3,6%. Теплота испарения 860 кДж/кг, теплота плавления 24,3 кДж/кг. В интервале температур от точки плавления до 1000 °С можно принимать среднюю теплоемкость свинца равной 0,0328 кДж/кг °С [25].

Преимущества. Прежде всего, свинец пожаро - и взрывобезопасен. К тому же он дешевле натрия, обладает сходными характеристиками, но кипит при более высокой температуре. Значит, до кризиса теплообмена, связанного с кипением, есть запас. Еще один важный плюс – даже если в корпусе реактора появится трещина, свинец естественным образом застынет и герметизирует ее [28].

Недостатки. Температура плавления выше, чем у натрия, соответственно давление внутри контуров должно быть больше. Поначалу ученые опасались, что это создаст трудности. Однако опасения были преувеличены.

Ряд примесей в жидком свинце и, в первую очередь, кислород, сурьма, мышьяк, олово и цинк оказывают вредное влияние на стойкость железа и сталей в его среде. Во время затвердевания свинец иногда прилипает к поверхности кварца и вызывает ее растрескивание [29].

В Федеральной целевой программе «Ядерно-энергетические технологии нового поколения» рассматривается создание опытно-демонстрационной станции БРЕСТ-ОД-300 со свинцовым теплоносителем, проект которого должен быть готов к 2015 году (главный конструктор энергоблока – Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники (НИКИЭТ) им. Доллежала). Чтобы реакторная установка заработала, ученые должны полностью отработать все технологии [28].

## **Свинцово-висмутовая эвтектика**

Температура плавления сплава составляет 123,5°C. Точка кипения 1670°C, увеличение объема сплава при плавлении составляет 1,3% [25,29].

Преимущества [32]:

- сплав химически инертен по отношению к воздуху и воде, не испускает водорода во время эксплуатации реактора, исключая вероятность химических взрывов.
- может сдерживать продукты деления (йод, цезий, — помимо инертных газов), снижая вероятность и тяжесть утечек радиоактивных материалов в атмосферу.
- высокая температура кипения (~1670°C) и максимальная теплоёмкость теплоносителя предотвращает аварии, которые связаны с недостатком обмена тепла (для расхолаживания реакторной установки из любого начального состояния степень естественной циркуляции теплоносителя достаточна).

Технология отработана: судовые ядерные энергетические установки на свинце-висмуте существуют не один десяток лет. Опыт их создания и эксплуатации будет крайне полезен при сооружении инновационного свинцово-висмутового быстрого реактора электрической (далее СВБР). Научным руководителем проекта является ФЭИ, а реализовываться он будет на площадке Научно-исследовательского института атомных реакторов [33].

Зачем понадобилось добавлять висмут? Чтобы нивелировать недостатки свинца. Таким образом, снижается температура плавления и облегчается работа с реактором. Здесь есть одно но – наработка на висмуте полония. Это ведет к ужесточению подходов к технологии очистки, безопасности [28].

В отличие от чистого свинца, сплав апробирован, в частности, на атомных подводных лодках. Но масштабировать технологию тяжело. К тому же

висмут довольно дорогой металл, а его производства в России нет. Для СВБР, электрическая мощность которого всего 100 МВт, свинец найдется, но если в следующих поколениях установок она будет повышаться, это может стать проблемой. Сплав больше пригоден для маломощных реакторов. В прочих случаях, пожалуй, оптимальны только два варианта – натрий и свинец [28].

Эвтектика свинец-висмут содержит 44,5% масс. свинца и 55,5% масс. висмута. Висмуту присущи худшие магнитные свойства из всех металлов, он обладает удельной теплопроводностью меньшей, чем у других металлов, ниже его по теплопроводности только ртуть. Плотность висмута (н.у.) – 9,84 г/см<sup>3</sup>. Температура плавления – 271,3°C. В недрах земли наличие висмута не превышает 3,4×10<sup>-6</sup>%. Металлические модификации висмута не окисляемы кислородом воздуха и устойчивы относительно воды. Свинцово-висмутовая эвтектика и свинец химически инертны относительно воздуха и воды; эти процессы взрывопожаробезопасны. В процессе реакции образуются оксиды теплоносителя, восстанавливаемые с помощью газовых смесей, например, на основе водорода [34].

Малоуглеродистая сталь обнаруживает хорошую стойкость в сплаве Pb-Bi до 500°C, если исключена возможность окисления сплава. Висмут оказывает более сильное коррозионное воздействие на нержавеющие стали, чем свинец. Подобно свинцу и висмуту, сплав оказывает агрессивное воздействие на нержавеющие стали аустенитного класса, содержащие никель, чем на хромистые нержавеющие стали. Поверхность вольфрамовых электродов, применяемых при измерении расхода жидких металлов магнитными расходомерами постепенно тускнеет в среде эвтектического сплава Pb-Bi. Это явление связано с окислением вольфрама кислородом, содержащимся в сплаве [29].

### **Сплав натрий-калий (Na-K)**

Сплавы с содержанием калия от 40 до 90% представляют собой при комнатной температуре серебристо-белые жидкости, причем наименьшую температуру плавления ( $-12,3^{\circ}\text{C}$ ) имеет сплав содержащий 77,2 % калия (эвтектика). При изменении состава сплава по сравнению с эвтектическим, температура его плавления постепенно увеличивается до температур плавления чистых компонентов. Кипит при температуре  $784^{\circ}\text{C}$ , теплота плавления составляет 79,5 кДж/кг, а теплота испарения 3450 кДж/кг [25].

Так натрий и калий входят в одну и ту же группу периодической системы и близки по физическим и химическим свойствам, изменение в свойствах при переходе от чистых металлов к сплавам подчиняется обычным закономерностям, а именно: повышается химическая активность, уменьшается электро - и теплопроводность; некоторые характеристики приобретают промежуточные значения (теплоемкость, теплосодержание, вязкость, упругость насыщенных паров и удельный вес). Поскольку приращения объема при плавлении компонентов сплава одинаковы и составляют ~ 2,5%, можно предположить, что увеличение объема сплавов равно той же величине [28].

Коррозионное воздействие натрия, калия и сплавов на материалы по сравнению с другими жидкометаллическими теплоносителями (Li, Ga, Hg, Sn, Pb, Bi) являются минимальными. Однако оно резко увеличивается при содержаниях кислорода в жидком металле, больших 0,01-0,02% и в условиях значительных температурных перепадов в системе [29].

### **Литий**

Литий — серебристо-белый металл, мягкий и пластичный, тверже натрия, но мягче свинца. Он тверже натрия, однако, куется при комнатной температуре. Литию характерны самые высокие температуры плавления и кипения ( $180,54$  и  $1340^{\circ}\text{C}$ , соответственно), чего не скажешь о других щелочных металлах. Теплота плавления 431 кДж/кг, теплота испарения 23000 кДж/кг, увеличение объема при плавлении составляет 1,5% [25].

Появление особых свойств металла обусловлено маленькими размерами лития. Например, при температуре ниже 380 °С он смешивается с натрием, но не смешивается жидкими калием, рубидием и цезием, в то время когда другие пары щелочных металлов смешиваются друг с другом в любых пропорциях. Литий - металл, быстро покрывающийся темно-серым налетом, состоящим из нитрида  $Li_3N$  и оксида  $Li_2O$ . Жидкий литий - теплоноситель в ядерных реакторах [26].

Преимущества. Литий не окисляется в абсолютно сухом воздухе и загорается лишь при нагревании его выше температуры плавления. Из-за высокой химической активности к кислороду, парам воды и азоту его хранят в герметичной упаковке, под слоем парафинового масла или керосина.

Применение лития, несмотря на его положительные свойства, ограничено трудностями выбора конструкционных материалов, работающих в контакте с расплавленным литием. В расплавленном литии имеют сравнительно низкую коррозионную стойкость хромоникелевые стали, а хромистые стали и чистое железо – удовлетворительную [23].

Большинство металлов образуют сплавы и разрушаются жидким литием. Коррозионная активность зависит также от содержания некоторых примесей, в частности углерода, в стали и жидком металле [34,35,36].

Ядерные свойства некоторых жидкометаллических теплоносителей представлены в таблице 1.2.1.1.

Таблица 1.2.1.1 - Ядерные свойства некоторых жидких металлов[29]

Изотопы	Относительное содержание, %	Сечение поглощения тепловых нейтронов, барны	Образующиеся изотопы	Период полураспада образующихся изотопов	Излучаемая энергия и вид частиц, Мэв
Литий		65	$He_4^2 + H_3^1$		0,015β
6	7,5	870			13 β
7	92,5	0,033		$Li_8^3$	0,85сек
Натрий 23	100	0,45	$Na_{24}^{11}$	14,8часов	1,4β; 1,38β; 2,76β
Калий		1,97			
39	93,4	1,87	$K_{40}^{19}$	$1,3 \times 10^9$ лет	1,46γ; 1,36β
40	0,01	~70	$A_{40}$	Устойчив	-
41	6,6	1,19	$K_{42}^{10}$	12,4часа	3,6β; 1,9β; 1,51γ
Ртуть		430			
196	0,15	3100	$Hg_{197}^{80}$	64часа } 23часа }	0,08 } 0,16 } изотермические формы
198	10,1	20	$Hg_{199}^{80}$	устойчив	
199	17	2500	$Hg_{200}^{80}$	устойчив	
200	23,3	60	$Hg_{201}^{80}$	устойчив	
201	13,2	60	$Hg_{202}^{80}$	устойчив	0,46 β
202	29,6	2,4	$Hg_{203}^{80}$	47 дней	0,3 γ
204	6,7	0,34	$Hg_{204}^{80}$	5,5мин	1,62β
Свинец		0,2	Активность пренебрежимо мала		-
204	1,5	Очень мало			
206	23,6				
207	22,6				
208	52,3				
Висмут			$RaE_{210}$	5 дней	1,17 β; 5,3α
209	100	0,015	Окончательно $Po_{210}$		

## 1.2.2 Перспективы использования жидкометаллических теплоносителей

Жидкометаллические теплоносители находят все большее распространение в атомной энергетике.

Идеальный теплоноситель должен обладать высокой теплопроводностью и теплоемкостью, малой вязкостью и незначительным

поперечным сечением захвата нейтронов; он должен быть химически стабилен в диапазоне рабочих температур при воздействии нейтронного поля, а возникающая радиоактивность – слабой и кратковременной. Теплоноситель должен быть химически неактивен в отношении корпуса реактора и делящегося материала или материала оболочки тепловыделяющих элементов, а также не быть дефицитным материалом.

Ни один из используемых в настоящее время теплоносителей не отвечает всем требованиям. При проектировании атомной установки приходится принимать компромиссное решение, выбирая теплоноситель по его положительным свойствам.

Жидкие металлы представляются в настоящее время единственными возможными охладителями для реакторов на быстрых нейтронах, так как использование газов исключается из-за невозможности обеспечения очень большой тепловой нагрузки объема или поверхности, а применение воды исключается вследствие ее замедляющего действия [29].

Вместе с тем, жидкие металлы имеют и отрицательные свойства – химическое воздействие с водой и воспламеняемость у натрия и калия, токсичность и большое поперечное сечение поглощения тепловых нейтронов у ртути, большая затрата энергии на циркуляцию у свинца и висмута.

Ртуть изначально подавала большие надежды как теплоноситель. Это тяжелый металл, что в свою очередь плохо замедляет нейтроны. Спектр такого реактора очень быстрый, и коэффициент воспроизводства высок. Ртуть — жидкость при комнатной температуре, что обуславливает простоту конструкции (что исключает необходимость подогрева жидкометаллического контура для пуска), помимо этого, предполагалось направлять пары ртути сразу в турбину, что приводило бы к очень высокому КПД при относительно низкой температуре. Чтобы отработать данный теплоноситель был сооружен реактор БР-2 мощностью 0,1МВт. К сожалению, реактор прослужил менее года. Главный недостаток ртути был определен ее высокой коррозионной активностью [31].

Менее чем за полгода, ртуть практически растворила контур реактора, при этом часто происходили течи. Также ртути обладаем следующими недостатками: токсичностью, дороговизной, большими затратами на перекачку. В итоге ртуть явилась экономически невыгодной как теплоноситель [31,37].

Из щелочных металлов лучшими по теплофизическим и гидравлическим свойствам являются натрий и литий. Они имеют наибольший коэффициент теплоотдачи и позволяют достичь максимально возможной температуры теплоносителя в активной зоне и свести к минимуму затраты мощности на циркуляцию. Натрий предпочтительнее лития по нейтронно-физическим свойствам, так как у него меньшее значение параметра замедления. Кроме того в состав природного лития входит изотоп  $^6\text{Li}$ , имеющий большое сечение поглощения нейтронов. Более высокая температура плавления лития усложняет технологию использования этого теплоносителя. Самым серьезным его недостатком является высокая коррозионная активность по отношению ко многим конструкционным материалам. Несовместимость лития с технологически освоенными материалами делает нецелесообразным применения его в качестве теплоносителя реакторов на быстрых нейтронах (далее РБН) [34].

Важной особенностью натриевого теплоносителя, которая должна учитываться при проектировании и эксплуатации РБН, является его высокая химическая активность, в частности при взаимодействии с кислородом и водой, в результате которой образуются окислы, резко повышающие скорость коррозии конструкционных материалов контура. Контакт натрия с воздухом возможен, например, при разуплотнениях оборудования, проведении ремонтных работ и перегрузке реактора. Поэтому в РБН предъявляются повышенные требования к герметичности натриевых систем и оборудования в процессе эксплуатации [38].

Концепция быстрого реактора, которому присуща естественная безопасность, нитридное уран – плутониевое топливо и свинцовый

теплоноситель – БРЕСТ – разрабатывается в Российской Федерации с конца 1980-х годов.

Концепция реактора БРЕСТ отличается от традиционных быстрых реакторов с натриевым теплоносителем [39]. Здесь используется плотное нитридное топливо равновесного состава в выгорании примерно 10% по тяжелым атомам; исключен урановый бланкет и производство плутония в качестве оружия; используется тяжелый теплоноситель с высокой температурой кипения – свинец; используются бесчехловые тепловыделяющие сборки (ТВС) с разреженной решеткой; имеются пассивные системы расхолаживания и отвода остаточных тепловыделений.

Серьезное препятствие для применения свинца атомной энергетикой обусловлено его высокой коррозионной активностью относительно конструкционных материалов по причине повышенной растворимости в нем их основных и легирующих составляющих [40,41]. Вероятность появления гидравлического удара для реактора со свинцовым теплоносителем в раз десять превышена, нежели с реакторах с водяным теплоносителем. Гидравлический удар возможен из-за резкого перекрытия проходного сечения на любом участке циркуляции теплоносителя. Наиболее опасным событием может явиться непредвиденная остановка главного циркуляционного насоса [42].

Точка плавления свинца составляет  $327^{\circ}\text{C}$  – является очень высокой точкой плавления, что станет причиной затруднения эксплуатации, потому что свинец необходимо всегда поддерживать в расплавленном состоянии, т.е. температурой обслуживания остановленного реактора является –  $400^{\circ}\text{C}$ .

В Российской Федерации, на основе опыта использования жидкометаллического теплоносителя в реакторах для атомных подводных лодок, создан концептуальный проект быстрого реактора со свинцово-висмутовым теплоносителем СВБР-75/100 [43]. Присущие свойства самозащищённости, обусловленные сочетанием типа реактора, качеств теплоносителя первого контура и конструкции РУ обеспечивают повышенную безопасность и простоту конструкции реакторов СВБР [44]. Потеря

теплоносителя при повреждении герметичности корпуса предотвращается интегральной (моноблочной) компоновкой всего оснащения первого контура в едином плотном корпусе, который имеет кожух защитный, небольшой свободный объём полости между кожухом защитным и корпусом [45].

В сплаве содержится примерно одинаковое количество свинца и висмута, он плавится при температуре  $125^{\circ}\text{C}$ , то есть близок к точке плавления натрия ( $98^{\circ}\text{C}$ ). В связи с этим, система обогрева получается простой, не нужно высокой температуры – всего 150-200 C, это легко поддерживать. Именно это явилось главным доводом в пользу свинца-висмута [31]. Фактор, который сдерживает применение свинцово-висмутовой эвтектики как теплоносителя в масштабной ядерной энергетике, обусловлен его высокой стоимостью. Помимо этого, вопрос с решением коррозии относительно конструкционных материалов пока не решен [41].

Недостатком свинцово-висмутового теплоносителя является то, что в ходе эксплуатации реактора в результате облучения нейтронами висмута образуется альфа-активный радионуклид полоний-210 [32].

Усилия специалистов различных стран направлены на создание реакторов четвертого поколения, обладающих свойствами внутренне присущей безопасности, эффективности использования топлива, экономической эффективности, снижения количества высокорadioактивных отходов, расширения топливной базы, способностью к нераспространению ядерных делящихся материалов.

Основная перспективность применения жидкометаллических теплоносителей в энергоконтурах объектов атомной энергетике заключается в том, что они отвечают положениям обеспечения безопасности, чего нельзя сказать о других теплоносителях. Применение жидкометаллических теплоносителей позволяет практически реализовать высокоэффективные технологические процессы, а также создавать новые ядерные энергетические установки с оригинальными научно-техническими решениями [22].

### **1.3 Общие сведения о быстром реакторе со свинцово-висмутовым теплоносителем**

Разработка быстрых технологий в Российской Федерации предполагает три направления: реактор со свинцовым теплоносителем на быстрых нейтронах, реактор со свинцово-висмутовым теплоносителем на быстрых нейтронах, реактор с натриевым теплоносителем на быстрых нейтронах [7]. В пределах Федеральной целевой программы «Ядерные энерготехнологии нового поколения на период 2010 - 2015 годов и на перспективу до 2020 года» выделено более 40 млрд. рублей на строительство и разработку реактора со свинцовым теплоносителем на быстрых нейтронах мощностью 300 МВт. 13 млрд. 228,2 млн. рублей выделено на разработку реактора со свинцово-висмутовым теплоносителем [46].

Проект модульного СВБР-100 на быстрых нейтронах активно разрабатывается, реакторная технология принадлежит ОКБ «Гидропресс» совместно с ГНЦ РФ, АЭП и др. предприятиям. Получение лицензии на размещение запланировано в 2013 году, а лицензии на сооружение в 2014 году. 2017 год назначен как срок физического запуска опытно-промышленного энергоблока с реактором со свинцово-висмутовым теплоносителем. Развертывание инфраструктуры и проект серийной АС и СВБР-100 намечен в 2016-2018 гг. [47].

Модульность реакторной технологии позволяет производить энергоблоки АЭС различной мощности кратной 100 МВт(э), основанные на едином унифицированном реакторном модуле, который в свою очередь, полностью производится на машиностроительном заводе и, железнодорожным либо другими видами транспорта доставляется на площадку АЭС. Это дает возможность использовать передовые методы поточной организации строительного-монтажных работ и стремительно уменьшить инвестиционный цикл строительства АЭС.

Предпосылками развития данного проекта являются [48]:

- растущий интерес к атомным комплексам малой мощности и модульным АС на их основе;
- тенденция развития «самозащищенных» технологий атомной генерации с «внутренне присущей» безопасностью;
- технология свинцово-висмутового быстрого реактора поколения IV с опытом использования 80 – реакторо-лет на отечественных подводных лодках.

Благодаря природным свойствам свинцово-висмутового теплоносителя, которые дают определённые преимущества данной реакторной технологии, теплоноситель в реакторе находится при низком, почти атмосферном давлении над его свободным уровнем. Следственно, в плане безопасности появляются огромные преимущества. Структура реакторной установки СВБР устраняет наиболее опасные аварийные ситуации, которые связаны с потерей теплоносителя.

Помимо всего, данный теплоноситель химически инертен. Отсутствует опасность пожаров и взрывов, так как он слабо взаимодействует с водой и воздухом. Как подтвердил опыт работы, что даже при образовании малых течей в парогенераторах, что исключено на блоках с реакторами других типов, сможет работать свинцово-висмутовый реактор [44].

Ведущими положениями концепции установок инновационного поколения типа СВБР являются [49]:

- пассивная безопасность и внутренняя самозащищенность;
- значительная простота конструкции реакторной установки и АС в целом по сравнению с традиционными ядерными технологиями;
- вероятность работы в разных топливных циклах при большой длительности топливной кампании - не меньше семи лет и на разных видах топлива;
- технологическая поддержка осуществления условий по нераспространению делящихся компонентов;

- ориентация на имеющуюся технологическую структуру и конструкционные материалы и консервативный подход при проектировании;
- предельно высокая заводская готовность компактность РУ;
- поточные способы организации строительно-монтажных работ и вероятность перехода на методы типового проектирования АС различной мощности и назначения;
- конкурентность на рынке электрической энергии и инвестиционный интерес АС при высоком потенциале будущего усовершенствования технико-экономических данных.

Относительно сооружения энергоблока СВБР существуют много мнений экспертов. Которые основываются на допущениях, т.к. часть оборудования никогда не изготавливалась. Например, совершенные насосы для перекачки жидкометаллического теплоносителя или парогенераторы с трубками из биметалла – технология, почти утраченная в России 30 лет назад. Следовательно, имеются разные оценки – от консервативной в 7000 долларов за киловатт до оптимистичных 4000-5000 долл. за кВт. Стоимость сооружения АЭС соответственно – от 400 до 700 млн. долл. без НИОКР [50].

Специалисты ВНИПИЭТ осуществляют расчет в пределах проекта сооружения опытно-промышленного энергоблока. Для прогнозирования кривой обучения для АЭС используются финансово-экономические модели. Данные для расчета представлены в МАГАТЭ.

#### **1.4 Аварийные ситуации, рассматриваемые при проектировании реакторов на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем**

Для ныне действующих атомных реакторов одной из эффективных мер по ограничению и управлению тяжелыми авариями с потерей теплоносителя, которые могут привести к превышению предельно допустимого аварийного выброса радиоактивных веществ в окружающую среду, является залив активной зоны водой. Однако ее охлаждение применительно к

тяжелой аварии может привести к еще более значительным повреждениям реактора [51].

Таким образом, необходимо детальное понимание процессов, происходящих в ходе развития аварии. Здесь важную роль играют моделирование теплогидравлических и физико-химических процессов, имплементация соответствующих моделей в численные коды.

Приведём определения основных понятий, которые применяются при рассмотрении безопасности РУ [52]:

Авария, относительно которой проектным планом установлены начальные и конечные события и предназначены системы безопасности, которые обеспечивают системы безопасности, либо одной, не зависящей от начального события называется проектной аварией.

Запроектная авария - авария, для которой проектом не предусмотрены исходные события. Это авария, которая сопровождается несколькими отказами системы безопасности свыше единичного отказа, воспроизведением ошибочных решений персонала. Результатом такой аварии могут стать тяжелые повреждения или расплавлением активной зоны. Чтобы уменьшить последствия такой аварии, аварию необходимо взять под контроль либо проводить реализацию планов мероприятий для защиты персонала и населения[53].

Тяжелой запроектной аварией (или тяжелой аварией) называется запроектная авария с повреждением ТВЭЛов выше максимального проектного предела, при которой может быть достигнут предельно допустимый аварийный выброс радиоактивных веществ в окружающую среду. Таким образом, тяжелая авария является частным случаем запроектной аварии [53].

**Тяжелая авария на быстром реакторе, охлаждаемом жидкометаллическим теплоносителем [54]**

Согласно нормативным документам [53] неотъемлемой частью обеспечения безопасности любой атомной станции является анализ запроектных аварий. Особое внимание быстрые реакторы заслужили высокой

энергонапряженностью топлива при плавлении активной зоны и его исходом. Одним из вероятных прогнозов предполагаемой (гипотетической) аварии может стать отказ циркуляционных насосов (ГЦН) контура теплоносителя реактора, и что приведет к полному отказу системы управления и защиты. Когда теплоносителем будет достигнута температура кипения в наиболее энергонапряженных каналах, это приведет к его выпариванию. Что, в свой черед ведет к возникновению в реакторе положительного эффекта реактивности, который ускорит процесс разогрева. Примерно через 1 с после образования в одной топливной сборке пустот в теплоносителе, топливо и оболочка начнут плавиться. В полости сборки образуется многообразная смесь жидкого топлива и его осколков, пара теплоносителя, жидкой стали, газа, который образовался при реакции деления. При расплавлении чехла топливной сборки, ближайшие топливные сборки могут быть повреждены и расплавлены [54].

Конструкцией реактора и его состоянием на момент начала аварии, могут быть определены нижеуказанные последствия:

1. к чрезвычайно большому росту реактивности с последующим выбросом и рассеиванием топливных материалов за счет газа, который образуется за счет процесса деления и содержится в порах и трещинах топливных таблеток, может привести процесс плавления, при котором большая часть неповрежденного топлива останется в активной зоне. Рассеивание топлива прекратит ядерную реакцию. Хотя образующаяся при этом ударная волна может привести к повреждению конструкции реактора и разрушению защитной оболочки.
2. если в итоге непрерывной утечки масса топлива снизилась до пятидесяти процентов первоначального, либо топливо было разбавлено большим числом материалов blankets, то это не приведет к значительному увеличению мощности. Расплавленное топливо стечет на дно реактора, и последующий исход событий не исключает возможность парового взрыва

из-за взаимодействия между расплавленным топливом и жидким теплоносителем, что остался в корпусе реактора [54].

Можно обозначить три важных фактора, которые влияют на чрезвычайные критерии анализируемой аварии: задержка срабатывания защиты, постоянная времени снижения расхода теплоносителя, развитие естественной циркуляции теплоносителя в контурах [55].

Снижение циркуляции расхода теплоносителя по контуру реактора, которое вызвано отказом главных циркуляционных насосов, сопровождается срабатыванием аварийной защиты с некоторой временной задержкой. При этом увеличение температуры теплоносителя на выходе может привести к росту давления первого контура. Температура теплоносителя на входе с некоторым запаздыванием, которое вызвано прохождением теплоносителя по тракту первого контура, снижается. Соотношение выходной температуры и давления в момент экстремума выходной температуры определяет запас до кипения теплоносителя. В данной работе проведено численное исследование теплового состояния тепловыделяющей сборки при снижении расхода теплоносителя.

Заклинивание ротора ГЦН. Попадание посторонних предметов в проточную часть насоса, поломки рабочего колеса или узла уплотнения вала ГЦН, могут привести к механическим повреждениям ГЦН. Данные причины могут привести к заклиниванию ротора насоса. Для аварии с заклиниванием ротора ГЦН является более резким, нежели при его отключении, снижение расхода теплоносителя через активную зону реактора. Учитывая малую вероятность такой аварии, обычно считается возможным заклинивание ротора только одного ГЦН [55].

Характер повреждения при заклинивании ГЦН определяет уменьшение оборотов ротора, но оно будет определено более резким, нежели при обесточивании насоса. Рассчитывая режимы с заклиниванием ротора ГЦН, обычно принимают наиболее неблагоприятный случай — мгновенная остановка ротора.

Аварии с локальным нарушением расхода. Снижение либо прекращение расхода теплоносителя вероятно в отдельной ТВС (или в нескольких ТВС) в процессе частичного или полного перекрытия сечения для прохода теплоносителя. Авария с закупоркой ТВС возможна, когда посторонние предметы попадают в хвостовик кассеты либо в нижнюю решетку пучка твэлов. Для оказания значительного влияния на расход теплоносителя, перекрытие должно быть достаточно большим. В итоге, аварийное уменьшение расхода через тепловыделяющую сборку приведет к выходу из строя твэлов и попаданию продуктов деления в контур. Колоссальное разрушение оболочек можно обнаружить по аномальному росту активности теплоносителя [55].

## **2 Описание программного комплекса ANSYS Fluent**

В области ядерной энергетики используется код ANSYS FLUENT, преимущественно в приложениях с преобладающими пространственными (3D) эффектами. При этом CFD моделирование предоставляет такие данные, которые обычно не могут быть получены ни путем технологических измерений, ни моделированием с помощью системных кодов, таких как RELAP5 и TRACE, например, для расчета 3D потоков и температурных полей в ядерном реакторе или бассейне выдержки отработанного ядерного топлива (ОЯТ). В этих случаях данные, полученные на основе CFD расчета, часто используются не только для анализа решенной проблемы, но и в качестве источника эталонной информации для настройки расчетных моделей в среде системных кодов [56].

### **2.1 Рабочая среда ANSYS Fluent**

ANSYS Fluent является программным модулем, обладающим широким спектром средств моделирования течений жидкостей и газов, применимых к промышленным задачам, которые учитывают турбулентность, теплообмен, химические реакции. Примерами использования Fluent могут быть такие задачи, как обтекание крыла, горение в печах, течение внутри барботажной колонны, течение в кровеносной системе, конвективное охлаждение сборки полупроводника, вентиляция в помещениях, моделирование промышленных стоков. Масштабы использования базового продукта значительно расширяются за счет специализированных моделей горения, аэроакустики, вращающихся/неподвижных расчетных областей, многофазных течений [20].

ANSYS Fluent – это основной продукт предназначенный для решения для задач гидрогазодинамики общего назначения, которые предлагает компания ANSYS, Inc.

Модуль основан на методе контрольных объемов, который характеризуется высокой точностью, и использующий решатель по давлению,

что дает возможность его применения в решении широкого круга инженерных задач.

Для решателя ANSYS Fluent применима сетка конечных объемов (числовые значения в центрах ячеек). В итоге данный подход формирует уравнения, применимые к конечным объемам, позволяющие сохранять значения потока. Это необходимое условие для точного решения задач гидрогазодинамики. ANSYS Fluent располагает следующими методами для решения: метод, основанный на плотности; расщепленный и сопряженный методы, основанные на давлении. Решатель располагает самыми ценными возможностями физического моделирования, чтобы получить более точные результаты [20].

Относительно числа сложных физических моделей, которые предлагаются для расчета на неструктурированных сетках, технология ANSYS Fluent занимает лидирующие позиции. Представлены наборы компонентов разнообразных форм: четырехугольники и треугольники для двумерных расчетов, гексаэдры, тетраэдры, полиэдры, призмы, пирамиды для трехмерных расчетов. Пользуясь инструментами ANSYS или инструментами других компаний можно построить сетки. Динамическая сетка ANSYS позволяет моделировать произвольное сложное перемещение частей в сложных задачах, например, в двигателе внутреннего сгорания, клапанах, в движении корабля по волнам, запуске ракет. Скользящая сетка и сеточные модели являются лучшим инструментом для описания периодического движения внутри смесительных баков, насосов и в турбомашинах. Модели с движущейся сеткой полностью совместимы со сложными моделями больших завихрений, реакций и многофазных потоков [20].

ANSYS Fluent включает методы численного решения и распараллеливания, основываясь на сложных числовых отказоустойчивых решателях. Наряду с сопряженным и расщепленным решателями с алгоритмом на основе давления, в составе ANSYS Fluent имеется два решателя с

алгоритмами, основанными на плотности. Что дает возможность получения точных результатов для практически любого течения. Улучшенные возможности параллельной обработки позволяют эффективно использовать несколько процессоров, а также многоядерные процессоры на одной или на нескольких машинах, объединенных сетью [20].

В ANSYS Fluent доступны следующие модели турбулентности: k-epsilon и k-omega моделей, модель турбулентных напряжений Рейнольдса для сильных вихревых или анизотропных потоков. Благодаря высокой расчетной мощности при незначительной стоимости модели турбулентности для расчета больших вихрей (LES-модели) и модели изолированных вихрей (DES) подходят для промышленных задач. Также доступны инновационные модели для прогнозирования перехода от ламинарного течения к турбулентному и новая модель адаптируемого масштаба Scale-Adaptive Simulation™ (SAS), предназначенная для течений, в которых недостаточно использования статических моделей турбулентности. Повышение точности результатов в пограничных условиях достигается благодаря улучшенным пристеночным функциям программного комплекса. Обеспечение корректного моделирования турбулентности для любых видов течений достигается за счет широкого набора турбулентности и возможности добавления пользовательских настроек [20].

Программный комплекс ANSYS Fluent позволяет проводить расчеты шума, возникающий в результате нестабильных изменений давления, конвективный теплообмен, теплопроводность, фазовый переход, теплообмен излучением, течения с химическими реакциями, в том числе горение газообразного, жидкого топлива, угля, многофазные потоки. Модель дискретных фаз (DPM-модель), модель Лагранжа применимы для некоторых задач многофазных потоков, таких как моделирование распылительной сушилки, непрерывного вытягивания волокна, распыления жидкого топлива, угольной топки. При впрыске частиц, пузырей, капель может учитываться теплоперенос, массоперенос, перенос импульса с основной фазой [20].

## 2.2 Сеточный генератор GAMBIT

Для построения расчетных сеток разных типов, Fluent представляет уникальное решение – набор программных комплексов, в составе которого GAMBIT [57], Tgrid и G/Turbo.

Последний является схожим с TurboGrid, при этом значительно уступая ему по функциональным возможностям. Отметим, что Fluent поддерживает сетки, созданные в GAMBIT.

Качество построенной расчетной сетки определяется качеством полученных результатов в ходе численного эксперимента. При помощи предпроцессора GAMBIT создание и обработка геометрии исследуемых процессов происходит быстрее. Чтобы создавать геометрические модели и строить сетки, в GAMBIT предусмотрен единый интерфейс. Помимо этого, все операции построения записываются в текстовый журнал. Это позволяет с легкостью отследить пути создания геометрической модели, исправить ошибки, перестроить сетки и модели, экспортировать результат в другую программу[57].

В GAMBIT осуществим импорт геометрии из различных CAD программ. Нередко импортирую геометрию, появляются проблемы, связанные с нестыковкой объектов. GAMBIT обладает встроенным модулем поиска и корректировки таких проблем, позволяющим упростить процедуру создания модели. GAMBIT имеет большие возможности, что позволяет создавать двумерные трехмерные расчетные области именно внутри программы, от начала построения линий, и до создания твердотельных элементов. Встроенный специализированный модуль G/Turbo автоматизирует создание геометрических моделей лопаточных машин.

GAMBIT имеет мощный генератор сеток, что позволяет создавать разные типы сеток, такие как: структурированная гексаэдральная сетка, автоматическая (неструктурированная) гексаэдральная и тетраэдральная сетки.

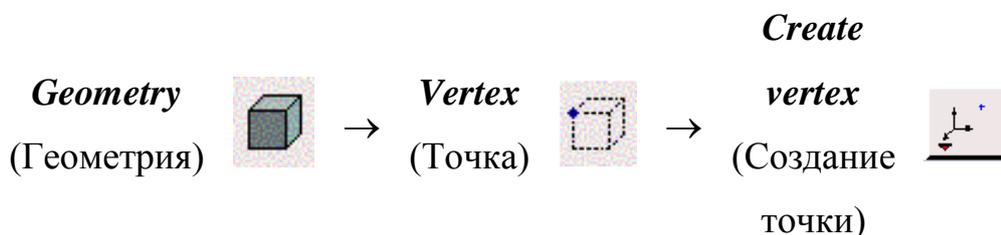
Помимо этого, он обладает возможностью создавать пограничные слои с комбинированными сетками. Построив сетку, пользователь может проверить ее качество по таким характеристикам, как: скошенность элементов, соотношение сторон [57].

### 2.3 Алгоритм решения задачи в программном комплексе ANSYS Fluent

Качеством построенной расчетной сетки определяется качество полученных результатов в ходе численного эксперимента. GAMBIT располагает единым интерфейсом, чтобы создавать геометрические модели и строить сетки [57].

Запускаем предпроцессор GAMBIT. Начинаем с построения геометрической модели.

1. Меню построения точек по координатам вызывается в главном меню с помощью команды:



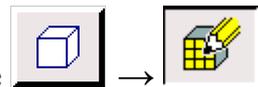
- 1.1 Для построения окружности Operation, находящемся в правом верхнем углу окна программы Gambit, следует выбрать:  → .

Задаем радиус окружности. Нажимаем «Apply».

Построенные плоскости соединяем в конечные элементы. Таким образом, строим оболочку тепловыделяющей сборки, а также и сами твэлы.

2. Меню работы с расчетными конечно-элементными сетками открывается нажатием кнопки «MESH COMMAND BUTTON» .

2.1 Выбрав опции чтобы создать сетки в объеме



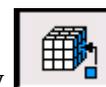
нажимаем кнопку , где появляется окно, и необходимо выбрать наши конечные элементы.

В поле «Interval Size» задаем размер элемента. Нажимаем «Apply». Далее задаем граничные условия, а также тип среды.

3. Выбираем кнопку «ZONES COMMAND BUTTON»



3.1 Чтобы задать граничные условия необходимо выбрать кнопку



Нажимая кнопку , в появившемся окне выберем соответствующую сторону входа/выхода теплоносителя, симметрию боковых стенок ТВС. В поле «Type» выберем тип граничных условий. Присваиваем имя для сторон в поле «Name». Нажимаем «Apply». Так необходимо сделать для всех сторон.

3.2 Чтобы задать среды необходимо выбрать кнопку



Нажимаем кнопку , в появившемся окне выберем соответствующую область «Faces». Выбираем тип –«FLUID»/«SOLID». Для дальнейшего удобства необходимо присвоить имя для нашей среды в «Name». Нажать «Apply». Таким образом, построена сеточная модель нашей задачи.

Получившуюся сеточную модель экспортируем. Для этого переходим в главное меню File → Export → Mesh... . В появившемся окне выбираем название файла, ставим галочку «Export 2D Mesh». Нажать «Apply».

При построении модели все операции записываются в текстовый файл, что дает возможность его применять как программный код, Чтобы сохранить журнал событий необходимо перейти File → View File. В открывшемся окне копируем код в текстовый документ.

### ***Построение физической модели в ANSYS Fluent***

Произведем запуск программного комплекса ANSYS Fluent. Для открытия файла сетки, необходимо в главном меню выбрать File → Read → Mesh.

Главное меню построения физической модели находится слева.

- 1) Параметры решателя задаются в главном меню раздел «General». В подразделе «Solver» выбираем тип решателя «Pressure-Based», в «Time» - «Steady», «Velocity Formulation» - «Absolute».
- 2) В разделе «Models» задаются уравнения: «Energy» - On, «Viscous» - «Standard k-epsilon Model».
- 3) В разделе «Materials» задаем свойства жидкой/ твердой среды. Нажимаем кнопку «Create». В появившемся окне задаем свойства жидкой / твердой среды. Нажимаем кнопку «Create».
- 4) Тип среды «fluid»/«solid» выбираем в разделе «Cell Zone Conditions». Каждой зоне тепловыделяющей сборки присваиваем тип среды. И задаем величину энерговыделения для источника тепловыделения.
- 5) В разделе «Boundary Conditions» зададим граничные условия на границы входа/выхода.

Для входной зоны «Inlet» в подразделе «Momentum» необходимо выбрать метод задания скорости «Mass Flow Specification Method» – «Mass Flow rate», и задаем массовый расход теплоносителя. Чтобы задать температуру теплоносителя на входе переходим в поле «Thermal» и в пункте «Total Temperature» задаем начальную температуру.

Для зоны «Outlet» в поле «Backflow Direction Specification Method» следует выбрать метод «Normal to Boundary».

- 6) В разделе «Reference Value» задаем начальные значения таких параметров, как: плотность, вязкость, температура.
- 7) Параметры решателя выбираем в разделе «Solution Methods». Далее необходимо в подразделе «Pressure-Velocity Coupling» выбрать схему

«Scheme» - «SIMPLE». В «Spatial Discretization» выбираем для давления «Pressure» - «Second Order». Что является намного подходящими опциями для нашего течения.

- 8) Для установления начального состояния задачи необходимо в разделе «Solution Initialization» нажать кнопку «Initialize»
- 9) Для настройки экспорта данных по ходу решения задачи, и выбора параметров для вывода, следует в разделе «Calculation Activities» указать директорию для записи.
- 10) Размер и число шагов задаем в разделе «Run Calculation». Для запуска решения необходимо нажать кнопку «Calculate». Когда решение будет завершено, появится всплывающее окно с уведомлением «Calculation completed».

Полученные данные сохраняем, перейдя File → Write → Case & Data.

## **4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение**

Целью данного раздела работы является технико-экономическое обоснование научно-исследовательских работ (НИР). Оно проводится с целью определения и анализа трудовых и денежных затрат, направленных на реализацию НИР, а также уровня научно-технической результативности НИР.

В рамках данной работы НИР включают в себя создание численного исследования процессов тепломассопереноса в активной зоне ядерного реактора при помощи программного комплекса. При выполнении численного исследования использовались программный комплекс ANSYS Fluent, предпроцессор Gambit, а также стандартная программа OriginPro 9.1. На основе НИР оформлена диссертационная работа в пакете программ Microsoft Office.

Для достижения поставленных целей данного раздела поставлены следующие задачи [63]:

- Оценка инновационного потенциала;
- Определение этапов работы, трудоемкости работы, составление плана-графика;
- Составление сметы затрат;
- Расчет нарастания технической готовности и целесообразности НИИ;

Первоначально производится организация и планирование работ, куда включается определение этапов работы и их трудоемкости.

### **4.1 Оценка инновационного потенциала НИР**

Современный этап развития атомной энергетики неразрывно связан с совершенствованием атомных электростанций (АЭС) с целью улучшения их экономических и эксплуатационных характеристик, а также повышения

безопасности. Разработка реакторов на быстрых нейтронах (РБН) Российской Федерации предполагает три объекта исследования: реактор со свинцовым теплоносителем, реактор со свинцово-висмутовым теплоносителем, реактор с натриевым теплоносителем [7].

Свинцово-висмутовые реакторные установки имеют высокую степень пассивной безопасности и внутренней самозащищенности, обладают простотой конструкции, возможностью эксплуатации на разных типах топлива, компактностью и максимальной заводской готовностью реакторной установки [8].

Разработка и обоснование систем безопасности требует проведения значительного комплекса теплофизических исследований ядерных энергетических установок, включая создание экспериментальных моделей, проведение численных исследований, разработку и совершенствование методов численного моделирования [10].

Таким образом, осуществление моделирования процесса тепломассопереноса в активной зоне РБН является актуальной задачей, обусловленной строгими требованиями по безопасности рабочих и возводимых атомных электростанций с реакторами на быстрых нейтронах, и также при создании установок нового поколения.

В данной работе впервые проведено численное исследование процессов тепломассопереноса в реакторе на быстрых нейтронах со свинцово-висмутовым теплоносителем. Создан вычислительный комплекс для моделирования данных процессов.

## 4.2 Определение этапов работы, трудоемкости работы, составление плана-графика

При организации процесса реализации конкретного проекта необходимо оптимально планировать занятость каждого из его участников и сроки проведения отдельных работ.

Первоначально составляется полный перечень проводимых работ, и определяются их исполнители и оптимальная продолжительность. Результатом планирования работ является сетевой, либо линейный график реализации проекта. Наиболее удобным, простым и наглядным способом для этих целей является использование линейного графика. Для его построения составим перечень работ и соответствие работ своим исполнителям в таблице 4.2.1. Основные исполнители в проекте: инженер (И) и научный руководитель (НР).

Таблица 4.2.1 – Перечень работ и продолжительность их выполнения

Этапы работы	Исполнители	Загрузка исполнителей
Формулирование задачи	НР	100%
Составление технического задания на проект	НР	90%
	И	10%
Поиск и изучение литературы	НР	20%
	И	80%
Разработка календарного плана	НР	80%
	И	20%
Разработка общего алгоритма программного комплекса	НР	30%
	И	70%
Реализация алгоритма в программном комплексе	НР	5%
	И	95%
Анализ полученных результатов численного исследования	И	100%
Оформление расчетно-пояснительной записки	И	100%
Подведение итогов – сравнение полученных результатов с желаемыми	НР	40%
	И	60%

Перейдем к расчету продолжительности этапов работ, который осуществляется опытно-статистическим методом, который реализуется вероятностным способом. Для определения ожидаемого значения продолжительности работ  $t_{ож}$  и других величин воспользуемся следующими формулами (4.2.1 – 4.2.4) [63].

$$t_{ож} = \frac{3 \cdot t_{\min} + 2 \cdot t_{\max}}{5}, \quad (4.2.1)$$

где  $t_{\min}$  – минимальная трудоемкость работ, чел/дн.;

$t_{\max}$  – максимальная трудоемкость работ, чел/дн.

Для построения линейного графика необходимо рассчитать длительность этапов в рабочих днях, а затем перевести в календарные дни. Расчет продолжительности выполнения каждого этапа в рабочих днях,  $T_{рд}$  ведется по формуле

$$T_{рд} = \frac{t_{ож}}{K_{вн}} \cdot K_{д}, \quad (4.2.2)$$

где  $t_{ож}$  – трудоемкость работы, чел/дн.;

$K_{вн}$  – коэффициент выполнения работ ( $K_{вн} = 1$ );

$K_{д}$  – коэффициент, учитывающий дополнительное время на компенсации и согласование работ ( $K_{д} = 1,2$ ).

Расчет продолжительности этапа в календарных днях,  $T_{кд}$  ведется по формуле

$$T_{кд} = T_{рд} \cdot T_{к}, \quad (4.2.3)$$

где  $T_{к}$  – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности,  $T_{к}$  рассчитывается по формуле:

$$T_{к} = \frac{T_{кал}}{T_{кал} - T_{вд} - T_{пд}}, \quad (4.2.4)$$

где  $T_{\text{кал}}$  – календарные дни ( $T_{\text{кал}} = 365$ );

$T_{\text{вд}}$  – выходные дни ( $T_{\text{вд}} = 52$ );

$T_{\text{пд}}$  – праздничные дни ( $T_{\text{пд}} = 12$ ).

$$T_{\text{к}} = \frac{365}{365 - 52 - 12} = 1,213$$

В таблице (4.2.2) приведены длительность этапов работ и число исполнителей, занятых на каждом этапе. На основании таблицы (4.2.1) составим линейный график работ и представим его на рисунке (4.2.1).

Таблица 4.2.2 – Трудозатраты на выполнение проекта

Этап	Исполнители	Продолжительность работ, дни			Длительность работ, чел/дн.			
		$t_{\min}$	$t_{\max}$	$t_{\text{ож}}$	ТРД		ТКД	
					НР	И	НР	И
Формулирование задачи	НР	2	4	2,8	3,36	–	4,08	–
Составление технического задания на проект	НР, И	2	3	2,4	2,59	0,29	3,14	0,35
Поиск и изучение литературы	НР, И	12	15	13,2	3,17	12,67	3,84	15,37
Разработка календарного плана	НР, И	2	4	2,8	2,69	0,67	3,26	0,82
Разработка алгоритма в программном комплексе	НР, И	8	15	10,8	3,89	9,07	4,72	11,00
Реализация алгоритма в программном комплексе	НР, И	18	25	20,8	1,25	23,71	1,51	28,76
Анализ результатов численного исследования	И	15	20	17	–	20,40	–	24,75
Оформление расчетно-пояснительной записки	И	10	15	12	–	14,40	–	17,47
Подведение итогов	НР, И	4	7	5,2	2,50	3,74	3,03	4,54
Итого:				87	19,44	84,96	23,58	103,06

Этапы работы	Исполнители	T <sub>к</sub> , кал, дн.	Продолжительность выполнения работ																	
			январь			февраль					март				апрель				май	
			11	18	25	1	8	15	22	29	7	14	21	29	5	12	19	26	3	
Формулирование задачи	Руководитель	4	■	■																
Составление технического задания на проект	Руководитель, инженер	3		■																
Поиск и изучение литературы	Руководитель, инженер	15			■	■														
Разработка календарного плана	Руководитель, инженер	4					■													
Разработка общего алгоритма программного комплекса	Руководитель, инженер	15					■	■	■											
Реализация алгоритма в программном комплексе	Руководитель, инженер	25								■	■	■	■							
Анализ полученных результатов численного исследования	Инженер (дипломник)	20											■	■	■	■				
Оформление расчетно-пояснительной записки	Инженер (дипломник)	15														■	■	■		
Подведение итогов – сравнение полученных результатов с желаемыми	Руководитель, инженер	7																■		

■ – руководитель

■ – инженер

Рисунок 4.2.1 - Линейный график работ на основе рассчитанного для инженера и научного руководителя времени ТКД

### 4.3 Составление сметы затрат

Оценим затраты на материалы. К данной статье расходов относится стоимость материалов, покупных изделий, полуфабрикатов и других материальных ценностей, расходуемых непосредственно в процессе выполнения работ. Цена материальных ресурсов определяется по средней рыночной стоимости на 2016 год по соответствующим ценникам и приведена в таблице (4.3.1).

Таблица 4.3.1 – Расходные материалы [64],[65],[66]

Наименование материалов	Цена за ед., руб.	Количество	Сумма, руб.
Офисная техника			
Компьютер	25999	1	25999
Клавиатура	490	1	490
Мышка	490	1	490
Принтер	4990	1	4990
Офисная мебель			
Стол	1899	1	1899
Стул	700	1	700
Программное обеспечение			
ANSYS Fluent	1 340 519,91	1	1 340 519,91
OriginPro 9.1	7000	1	7000
Microsoft Office 2010	10599	1	10599
Итого:	1392686,91		

Расходы на материалы составили  $C_{\text{мат}} = 1392686,91$ руб.

Следующей статьёй расходов НИР для оценки является заработная плата исполнителей. Данная статья расходов включает заработную плату научного руководителя и инженера, а также премии, входящие в фонд заработной платы. Расчет основной заработной платы выполняется на основе трудоемкости выполнения каждого этапа и величины месячного оклада исполнителя.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$\text{Дневная з. пл} = \frac{\text{Месячный оклад}}{25,08 \text{ дней}}, \quad (4.3.1)$$

Расчет затрат на основную заработную плату приведен в таблице 4.3.2.

Таблица 4.3.2 – Затраты на основную заработную плату

Исполнитель	Оклад, руб./мес.	Среднедневная ставка, руб./день	Затраты времени, дни	К	Фонд з/платы, руб.
НР	34595,56	1379,4	24	1,4	46347,84
И	17105,77	682,05	104	1,4	99306,48
Итого:			145654,32		

Таким образом, затраты на основную заработную плату составили  $ЗП_{\text{осн}} = 145654$  руб. При расчете учитывалось, что в году 301 рабочий день и, следовательно, в месяце 25,08 рабочих дня. Затраты времени на выполнение работы по каждому исполнителю брались из таблицы (4.2.2). Также был принят во внимание коэффициент, учитывающий коэффициент по премиям  $K_{\text{ПР}} = 0,1$  и районный коэффициент  $K_{\text{РК}} = 0,3$ . Итоговый коэффициент ( $K = 1 + K_{\text{ПР}} + K_{\text{РК}} = 1 + 0,1 + 0,3 = 1,4$ ).

Дополнительная заработная плата рассчитывается исходя из 10-15% от основной заработной платы, работников, непосредственно участвующих в выполнении темы [63], используемые формулы (4.3.2 – 4.3.12) взяты [63]:

$$ЗП_{\text{доп}} = 0,1 \cdot ЗП_{\text{осн}}, \quad (4.3.2)$$

$$ЗП_{\text{доп}} = 0,1 \cdot 145654 = 14565,4 \text{ руб.}$$

Фонд заработной платы:

$$\Phi ЗП = ЗП_{\text{осн}} + ЗП_{\text{доп}}, \quad (4.3.3)$$

$$\Phi ЗП = 145654 + 14565,4 = 160219,4 \text{ руб}$$

Расчет отчислений от фонда оплаты труда

Затраты по этой статье составляют отчисления по единому социальному налогу (ЕСН).

Отчисления по заработной плате определяются по следующей формуле:

$$С_{\text{соц}} = К_{\text{соц}} \cdot \Phi ЗП, \quad (4.3.4)$$

где  $К_{\text{соц}}$  – коэффициент, учитывающий размер отчислений из заработной платы. Данный коэффициент составляет 27% от затрат на заработную плату.

$$С_{\text{соц}} = 0,27 \cdot 160219,4 = 43259,2 \text{ руб.}$$

Перейдем к расчету затрат на электроэнергию. Данный вид расходов включает в себя затраты на электроэнергию при работе оборудования а также затраты на электроэнергию, потраченную на освещение. Затраты на электроэнергию при работе оборудования для технологических целей  $Э_{\text{об}}$  рассчитываются по формуле

$$Э_{\text{об}} = Р_{\text{об}} \cdot Ц_{\text{э}} \cdot t_{\text{об}}, \quad (4.3.5)$$

где  $Р_{\text{об}}$  – мощность, потребляемая оборудованием, кВт;

$\text{Ц}_\text{Э}$  – тарифная цена за 1 кВт·час, принимаем  $\text{Ц}_\text{Э} = 1,8$  руб/кВт · час;

$t_{\text{ОБ}}$  – время работы оборудования, час.

Время работы оборудования вычисляется на основе данных для  $T_{\text{РД}}$  таблицы 2 для инженера из расчета, что продолжительность рабочего дня равна 8 часов

$$t_{\text{ОБ}} = T_{\text{РД}} \cdot 8, \quad (4.3.6)$$

$$t_{\text{ОБ}} = 85 \cdot 8 = 680 \text{ час.}$$

Мощность, потребляемая оборудованием  $P_{\text{ОБ}}$ , принимаем равную мощности блока питания компьютера и монитора

$$P_{\text{ОБ}} = P_{\text{БП}} + P_{\text{М}}, \quad (4.3.7)$$

$$P_{\text{ОБ}} = 0,4 + 0,1 = 0,5 \text{ кВт,}$$

$$\text{Э}_{\text{ОБ}} = 0,5 \cdot 1,8 \cdot 680 = 612 \text{ руб.}$$

Затраты на электроэнергию для освещения помещения, где осуществлялось выполнение проекта  $\text{Э}_{\text{ОС}}$ , рассчитываются по формуле

$$\text{Э}_{\text{ОС}} = P_{\text{ОС}} \cdot \text{Ц}_\text{Э} \cdot t_{\text{ОС}}, \quad (4.3.8)$$

где  $P_{\text{ОС}}$  – мощность, потребляемая осветительными приборами, кВт;

$t_{\text{ОС}}$  – время работы осветительных приборов, час.

Мощность, потребляемая освещением  $P_{\text{ОС}}$ , определяется по формуле

$$P_{\text{ОС}} = P_{\text{УСТ.ОС}} \cdot K_{\text{С}}, \quad (4.3.9)$$

где  $P_{\text{УСТ.ОС}}$  – установленная мощность осветительных приборов,

принимаем  $P_{\text{УСТ.ОС}} = 1,28$  кВт;

$K_C$  - коэффициент спроса для внутреннего освещения, принимаем  $K_C = 0,9$ .

$$P_{OC} = 1,28 \cdot 0,9 = 1,15 \text{ кВт.}$$

Время работы освещения  $t_{OC}$ , час, определяется по формуле

$$t_{OC} = t_{СУТ} \cdot T, \quad (4.3.10)$$

где  $t_{СУТ}$  – длительность работы освещения за смену, час;

$T$  – время, затраченное на проведение работ,

принимаем  $T = 85$  дней.

$$t_{OC} = 5 \cdot 85 = 425 \text{ час,}$$

$$\mathcal{E}_{OC} = 1,15 \cdot 1,8 \cdot 425 = 881,28 \text{ руб.}$$

Общие затраты на электроэнергию  $\mathcal{E}$ , руб, определяются по формуле

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_{OB} + \mathcal{E}_{OC}, \quad (4.3.11)$$

$$\mathcal{E} = 612 + 881,28 = 1561,28 \text{ руб.}$$

Следующим этапом расчёта затрат является расчет амортизационных расходов

Амортизационные отчисления рассчитываются на время использования ЭВМ по формуле

$$C_{AM} = \frac{N_A \cdot C_{OB}}{F_d} \cdot t_{BT}, \quad (4.3.12)$$

где  $N_A$  – годовая норма амортизации,

принимаем  $N_A = 25\%$ ;

$C_{OB}$  – цена оборудования,

исходя из таблицы 4.3.1. принимаем  $C_{OB} = 25999$  руб.;

$F_D$  – действительный годовой фонд рабочего времени,

принимая  $F_D = 2416$  часов;

$t_{BT}$  – время работы вычислительной техники при создании программного продукта, по таблице 10  $t_{BT} = 104 \cdot 8 = 832$  час.;

$$C_{AM} = \frac{0,25 \cdot 25999}{2416} \cdot 832 = 2238,32 \text{ руб.}$$

Для оценки не учтённых в предыдущих статьях расходов рассчитаем прочие расходы [63].

Прочие расходы составляют 16 % от единовременных затрат на выполнение технического продукта и проводятся по формуле:

$$C_{ПРОЧ} = (C_{МАТ} + C_{ОСН} + C_{СОЦ} + Э + C_{AM}) \cdot 0,16, \quad (4.3.13)$$

$$\begin{aligned} C_{ПРОЧ} &= (1392686,91 + 145654,32 + 43259,2 + 1561,28 + 2238,32) \cdot 0,16 = \\ &= 253664,01 \text{ руб.} \end{aligned}$$

Определим общую себестоимость НИР путем сведения рассчитанных статей расчета в смету (таблица 4.3.3).

Таблица 4.3.3 – Смета затрат на НИР

Статья затрат	Условное обозначение	Сумма, руб.
1	2	3
Материалы и покупные изделия	$C_{\text{МАТ}}$	1392686,91
Фонд оплаты труда	$C_{\text{ОСН}}$	145654,32
Отчисления из ФОТ	$C_{\text{СОЦ}}$	43259,2
Расходы на электроэнергию	Э	1561,28
Амортизационные отчисления	$C_{\text{АМ}}$	2238,32
Работы, выполняемые сторонними организациями	$C_{\text{СТОП}}$	–
Прочие расходы	$C_{\text{ПРОЧ}}$	253664,01
Итого:		1839064,04

Таким образом, расходы на НИР составили:  $C = 1839064,04$ руб.

#### 4.4 Расчет нарастания технической готовности работ

Следующим этапом является расчет нарастания технической готовности работ. Величина нарастания технической готовности работы  $H_i$  показывает на сколько процентов выполнена работа на каждом этапе. Данная величина вычисляется по формуле (4.4.1)[63]:

$$H_i = \frac{t_{Hi}}{t_0} \cdot 100\%, \quad (4.4.1)$$

где  $t_{Hi}$  - нарастающая трудоемкость с момента начала работы  $i$ -го этапа;

$t_0$  - общая трудоемкость.

Общая трудоемкость  $t_0$ , вычисляется по формуле (4.4.2)[63]:

$$t_0 = \sum_{i=1}^n t_{ож_i}, \quad (4.4.2)$$

где  $t_{ож_i}$  - ожидаемая продолжительность  $i$ -го этапа.

Удельный вес каждого этапа  $Y_i$  определяется по формуле (4.4.3)[63]:

$$Y_i = \frac{t_{ож_i}}{t_0} \cdot 100\%. \quad (4.4.3)$$

Результаты вычислений  $H_i$  и  $Y_i$  отражены в таблице 4.4.1.

Таблица 4.4.1 – Нарастание технической готовности работы и удельный вес каждого этапа

	Этап	$H_i, \%$	$Y_i, \%$
1	Формулирование задачи	3,22	3,22
2	Составление технического задания на проект	5,98	2,76
3	Поиск и изучение литературы	21,15	15,17
4	Разработка календарного плана	24,37	3,22
5	Разработка общего алгоритма программного комплекса	36,78	12,41
6	Реализация алгоритма в программном комплексе	60,69	23,91
7	Анализ полученных результатов численного исследования	80,23	19,54
8	Оформление расчетно-пояснительной записки	94,02	13,79
9	Подведение итогов	100,00	100,00

Таким образом, мы видим процесс нарастания технической готовности вплоть до полного выполнения с течением времени по ходу последовательного выполнения определенных этапов.

В данном разделе работы определены этапы и трудоемкость работ, составлены план-график и смета затрат, произведен расчет нарастания технической готовности программного комплекса. Программный комплекс завершен на 100% и готов к использованию.

Согласно смете затрат, расходы на НИР составили  $C = 1839064,04$  руб.

Данный проект является экономически эффективным, так как при затратах около двух миллионов рублей позволяет спрогнозировать аварии в активной зоне ядерного реактора и тем самым предотвратить потери объемом в стоимость постройки нового оборудования и ущерба окружающей среде.

При возникновении чрезвычайной ситуации, связанной с потерей теплоносителя в активной зоне ядерного и последующем ее разрушении вследствие протекания необратимых физических процессов тепломассопереноса, а также нарушении работы главных циркуляционных насосов, наносится большой ущерб как самому оборудованию, так и окружающей среде из-за утечек радиоактивного теплоносителя, и продуктов деления в атмосферу. Исходя из этого видно, что затраты на численное исследование тепломассопереноса в активной зоне ядерного реактора, обусловленное повышенными требованиями к безопасности АЭС незначительны по сравнению с возможными расходами необходимыми на восстановление оборудования после возникновения чрезвычайной ситуации.

## **Список публикаций**

- 1) Ахметшина Г.С., Математическое моделирование теплового состояния тепловыделяющей сборки на стационарном уровне мощности // Одиннадцатая международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2016»: Материалы конференции. В 6 т. Т.2 – Иваново: ФГБОУ ВО Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина, 2016. С. 3-5.