ВСЕРОССИЙСКИЙ МОЛОДЕЖНЫЙ КОНКУРС ПО ПРОБЛЕМАМ КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ, ЭКОЛОГИИ И БЕЗОПАСНОСТИ ЖЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ «ЮНЭКО»

Направление: физика

Тема: «Естественная циркуляция в системах безопасности реакторов»

Соискатель:
Русина София Александровна
ученица 10 класса МАОУ «Лицей № 38»
г. Нижнего Новгорода

Научный руководитель:
Еделев Андрей Юрьевич
учитель физики МАОУ «Лицей № 38»
г. Нижнего Новгорода

Место выполнения работы:
г. Нижний Новгород

2026 г.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ ……3

1. Актуальность ……... 3
2. Цель: Исследование естественной циркуляции теплоносителя ……. 4
3. Задачи:

1. Исследовать историю развития естественной циркуляции теплоносителя, появление первых контуров с ЕЦ и их применение в реакторных установках……5

2. Изучить принцип естественной циркуляции теплоносителя и её роль в системах безопасности реакторных установок……....7

3. Рассмотреть системы безопасности различных типов реакторов, основанные на естественной циркуляции……9

4. Определить параметры маневрирования расходом охлаждающей воды для исследования естественной циркуляции…….…10

5. Изучить методы и режимы маневрирования расходом охлаждающей воды…….....12

6. Провести серию экспериментов на стенде ФТ-101 при различных режимах изменения расхода охлаждающей воды……..13

7. Проанализировать влияние маневрирования расходом охлаждающей воды на устойчивость естественной циркуляции……..…17

8. Оценить возможности применения полученных результатов для систем безопасности реакторных установок……...18

9. Систематизировать данные о конструкции стенда ФТ-101 для построения информационной модели……..…18

10. Обобщить результаты экспериментов и представить их в виде, пригодном для практического использования……22

ЗАКЛЮЧЕНИЕ……...…24

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ……..……27

Естественная циркуляция в системах безопасности реакторов

Введение:

Современные реакторные установки всё чаще ориентируются на пассивные системы безопасности, работающие за счёт естественной циркуляции теплоносителя. Такой подход позволяет отводить остаточное тепловыделение без принудительных насосов и внешнего электроснабжения, что особенно важно при запроектных авариях с потерей энергопитания. Именно на принципе естественной циркуляции базируются ключевые системы безопасности реакторов различных типов.

Вместе с тем режимы естественной циркуляции обладают сложной теплогидравлической картиной и чувствительны к внешним воздействиям. Изменение расхода охлаждающей воды, тепловой мощности или гидравлического сопротивления контура может приводить к неустойчивости потока, пульсациям расхода и температуры, вплоть до срыва циркуляции. Подобные режимы представляют прямую угрозу работоспособности систем безопасности, поэтому их экспериментальное и расчётное изучение является важной задачей.

Особый интерес представляет маневрирование расходом охлаждающей воды — воздействие, которое может возникать как в нормальной эксплуатации, так и в аварийных сценариях. Поведение контура с естественной циркуляцией при таких воздействиях изучено недостаточно полно, а существующие расчётные модели требуют экспериментального подтверждения.

Актуальность:

Актуальность работы обусловлена необходимостью обоснования устойчивости пассивных систем безопасности реакторных установок, основанных на естественной циркуляции теплоносителя. Влияние маневрирования расходом охлаждающей воды на эти процессы изучено недостаточно. Полученные данные необходимы для верификации расчётных кодов и подтверждения запасов безопасности.

Цель:

Исследование естественной циркуляции теплоносителя на стенде при маневрировании расходом охлаждающей воды, анализ полученных данных, их применение к системам безопасности реакторных установок.

Задачи:

1. Исследовать историю развития естественной циркуляции теплоносителя, появление первых контуров с ЕЦ и их применение в реакторных установках.

2. Изучить принцип естественной циркуляции теплоносителя и её роль в системах безопасности реакторных установок.

3. Рассмотреть системы безопасности различных типов реакторов, основанные на естественной циркуляции.

4. Определить параметры маневрирования расходом охлаждающей воды для исследования естественной циркуляции.

5. Изучить методы и режимы маневрирования расходом охлаждающей воды.

6. Провести серию экспериментов на стенде ФТ-101 при различных режимах изменения расхода охлаждающей воды.

7. Проанализировать влияние маневрирования расходом охлаждающей воды на устойчивость естественной циркуляции.

8. Оценить возможности применения полученных результатов для систем безопасности реакторных установок.

9. Систематизировать данные о конструкции стенда ФТ-101 для построения информационной модели.

10. Обобщить результаты экспериментов и представить их в виде, пригодном для практического использования.

1. Исследовать историю развития естественной циркуляции теплоносителя, появление первых контуров с ЕЦ и их применение в реакторных установках.

Естественная циркуляция теплоносителя — это физическое явление, при котором движение жидкости в замкнутом контуре происходит без использования насосов, за счёт разности плотностей нагретых и охлаждённых слоёв. Нагретая жидкость становится легче и поднимается вверх по одной ветви контура, а охладившись в теплообменнике или радиаторе — опускается вниз по другой. Этот принцип известен человечеству задолго до появления ядерной энергетики.

Первые практические применения естественной циркуляции относятся к XVIII–XIX векам. В паровых котлах систем отопления вода циркулировала по трубам именно за счёт разности температур, без насосов. В 1831 году американский инженер Джейкоб Перкинс запатентовал первую систему центрального отопления с естественной циркуляцией. В конце XIX века такие системы стали массовыми в жилых домах Европы и России. Именно тогда были заложены основы расчёта контуров с ЕЦ: зависимость расхода от тепловой мощности, высоты контура и гидравлического сопротивления.

С началом атомной эры в 1940–1950-х годах перед инженерами встала принципиально новая задача — отводить тепло от активной зоны ядерного реактора, где плотность тепловыделения в тысячи раз выше, чем в обычных теплообменниках. Первые реакторы, включая американский «Экспериментальный реактор-размножитель I» (EBR-I, 1951) и советскую Обнинскую АЭС (1954), использовали принудительную циркуляцию теплоносителя с помощью насосов. Однако уже на этапе проектирования рассматривалась возможность применения ЕЦ в качестве резервного и аварийного механизма.

Особый импульс развитию ЕЦ дала авария на реакторе в Айдахо-Фоллс (1961), где отказ насосов привёл к расплавлению активной зоны. После этого случая в проектах реакторов стали закладывать пассивные системы отвода

тепла, работающие за счёт естественной циркуляции. В 1960-х годах в США и СССР начались исследования устойчивости контуров с ЕЦ применительно к ядерным энергетическим установкам.

В 1950–1970-х годах естественная циркуляция нашла широкое применение в транспортных реакторных установках. На атомных ледоколах, начиная с «Ленина» (1959), и на подводных лодках контуры с ЕЦ использовались для повышения надёжности и упрощения конструкции. В исследовательских реакторах бассейнового и кипящего типа ЕЦ применялась для отвода тепла при малых мощностях. Важным этапом стало создание кипящих реакторов (BWR), где естественная циркуляция использовалась как основной режим работы контура. Например, реактор Dodewaard в Нидерландах (1969) работал на ЕЦ в нормальном режиме.

В 1980–1990-х годах, после аварий на Три-Майл-Айленде (1979) и Чернобыле (1986), требования к безопасности АЭС резко ужесточились. Именно тогда принцип ЕЦ стал рассматриваться как основа пассивных систем безопасности. Были разработаны проекты реакторов с полностью пассивным отводом тепла: AP600 и AP1000 (США), SWR-1000 (Германия), ВВЭР-640 (Россия). В этих проектах естественная циркуляция обеспечивала отвод остаточного тепловыделения без насосов и внешнего электроснабжения в течение длительного времени.

В XXI веке естественная циркуляция стала одним из ключевых принципов при создании реакторов нового поколения. В проектах ВВЭР-ТОИ, БН-1200, малых модульных реакторов (Академик Ломоносов, RITM-200, NuScale) пассивные системы отвода тепла на основе ЕЦ являются обязательным элементом. Современные исследования направлены на изучение устойчивости ЕЦ при переходных режимах, включая маневрирование расходом охлаждающей воды, что напрямую связано с обеспечением безопасности реакторных установок.

Таким образом, история развития естественной циркуляции теплоносителя показывает её путь от простого физического явления, известного с XVIII века, до одного из ключевых принципов обеспечения безопасности современных реакторных установок.

2. Изучить принцип естественной циркуляции теплоносителя и её роль в системах безопасности реакторных установок.

Естественная циркуляция теплоносителя — это движение жидкости или газа в замкнутом контуре под действием гравитационных сил, возникающих из-за разности плотностей в разных участках контура. В отличие от принудительной циркуляции, где движение обеспечивается насосами, здесь движущей силой является сама природа: нагретая среда легче, холодная — тяжелее. Эта разница создаёт непрерывный поток, который не требует внешнего источника энергии.

Физическая основа ЕЦ описывается законом сообщающихся сосудов и уравнением Бернулли. Движущий напор контура определяется разностью высот между нагревателем и охладителем, а также разностью плотностей теплоносителя на этих участках. Чем больше тепловая мощность, чем выше контур и чем меньше гидравлическое сопротивление, тем интенсивнее циркуляция. Однако при определённых условиях — малой мощности, большом сопротивлении или неудачной геометрии — циркуляция может стать неустойчивой: возникают пульсации расхода, обратные токи, вплоть до полного срыва.

Для количественной оценки интенсивности ЕЦ используется несколько ключевых параметров. Прежде всего, это движущий напор, который зависит от высоты контура и разности плотностей. Далее — гидравлическое сопротивление, складывающееся из сопротивления трения и местных сопротивлений. И наконец — число Фруда, которое показывает соотношение сил инерции и гравитации и позволяет судить о устойчивости потока. Эти

параметры лежат в основе расчёта и проектирования контуров с естественной циркуляцией.

В реакторных установках естественная циркуляция выполняет две ключевые функции. Во-первых, она обеспечивает отвод тепла от активной зоны в нормальных режимах работы — например, в кипящих реакторах (BWR) и некоторых транспортных установках. Во-вторых, и это главное, ЕЦ лежит в основе пассивных систем безопасности, которые должны работать при потере электроснабжения, отказе насосов и других аварийных ситуациях.

Роль ЕЦ в системах безопасности определяется несколькими факторами. Прежде всего, это автономность: контур с естественной циркуляцией не зависит от внешних источников энергии, что критически важно при запроектных авариях. Далее — надёжность: отсутствие движущихся частей (насосов, приводов) снижает вероятность отказа. И наконец — простота: пассивные системы требуют меньше обслуживания и контроля, чем активные. Кроме того, естественная циркуляция обеспечивает самозащиту: при повышении тепловой мощности увеличивается и движущий напор, что автоматически усиливает циркуляцию и отвод тепла.

Следует отметить и ограничения естественной циркуляции. Она чувствительна к геометрии контура, высоте и диаметру трубопроводов. При малых мощностях движущий напор может оказаться недостаточным для преодоления сопротивления. Возможны режимы теплогидравлической неустойчивости, когда расход и температура начинают колебаться с определённой частотой. Всё это требует тщательного расчётного и экспериментального обоснования.

В современных проектах реакторов пассивные системы на основе ЕЦ применяются для отвода остаточного тепловыделения, аварийного охлаждения активной зоны, отвода тепла от парогенераторов и охлаждения корпуса реактора. Примерами могут служить система пассивного отвода тепла (СПОТ) в проекте ВВЭР-ТОИ, система аварийного охлаждения активной зоны (САОЗ) с естественной циркуляцией в AP1000, а также пассивные системы в малых

модульных реакторах. В каждом из этих случаев ЕЦ обеспечивает отвод тепла без вмешательства оператора и без внешних источников энергии.

Таким образом, естественная циркуляция теплоносителя является не просто физическим эффектом, а фундаментальным принципом, на котором базируются современные системы безопасности реакторных установок. Её изучение необходимо для понимания того, как обеспечить надёжный отвод тепла в самых сложных и опасных условиях эксплуатации.

3. Рассмотреть системы безопасности различных типов реакторов, основанные на естественной циркуляции.

Анализ эволюции систем аварийного отвода тепла (САОТ) показывает, что для различных типов реакторных установок прослеживаются общие конструктивные и схемные решения, основанные на естественной циркуляции (ЕЦ). В качестве конечного поглотителя тепла в большинстве случаев выступает атмосферный воздух.

Судовые ядерные энергетические установки (ЯЭУ). В диссертации [Текст диссертации, стр. 23-26] выделяется три поколения пассивных систем отвода тепла для реакторов типа ВВРД.

· Первое поколение: Цистерны с запасом воды (ЦАР) отключены от парогенераторов (ПГ). В аварийном режиме арматура открывается, и теплоотвод происходит за счет ЕЦ воды из ЦАР. Недостатки: риск выхода активности при разгерметизации ПГ и принудительная циркуляция воздуха через ЦАР с помощью компрессора.

· Второе поколение: Введен промежуточный теплообменник (ТО САР), что исключает выход активности. Баки ЦАР связаны с атмосферой, тепло отводится за счет выпаривания воды. Циркуляция во всех контурах — естественная. Недостатки: низкие движущие напоры ЕЦ и низкая эффективность отвода тепла в воздух.

· Третье поколение: Установка воздушного теплообменника (ВТО) на грот-мачту для максимального напора ЕЦ. Дополнительное доохлаждение теплоносителя в расширительной цистерне (РЦ) с водой перед ВТО.

Реакторы на быстрых нейтронах (БН). Для БН-600, БН-800 и БН-1200 система САОТ также основана на ЕЦ натрия [Текст диссертации, стр. 26-29]. В БН-600 САОТ подключена к одной из трех петель второго контура. В БН-800 система установлена на каждую из трех петель, а циркуляция через воздушные теплообменники (ВТО) осуществляется за счет ЕЦ, а не компрессоров. В проекте БН-1200 предусмотрены автономные теплообменники САОТ, установленные непосредственно в корпусе реактора, с естественной циркуляцией натрия первого контура.

ВВЭР (проекты АЭС-2006 и ВВЭР-ТОИ). Система пассивного отвода тепла (СПОТ) обеспечивает отвод остаточного тепловыделения (до 2% номинальной мощности) через второй контур к теплообменникам, охлаждаемым атмосферным воздухом за счет естественной конвекции. СПОТ состоит из четырех независимых пароконденсатных контуров, включение которых происходит при открытии воздушных затворов [Текст диссертации, стр. 30-31].

Вывод по разделу: Для всех рассмотренных типов реакторных установок характерно использование ЕЦ в качестве основного механизма аварийного отвода тепла. Это подтверждает актуальность исследования устойчивости данного процесса.

4. Определить параметры маневрирования расходом охлаждающей воды для исследования естественной циркуляции.

Под маневрированием расходом охлаждающей воды в контексте данной работы понимается целенаправленное изменение параметров, влияющих на теплосъем с контура ЕЦ. В отличие от стационарных испытаний,

маневрирование позволяет воспроизводить динамические режимы, характерные для реальной эксплуатации и аварийных ситуаций.

Физическая сущность. Естественная циркуляция определяется балансом между движущим напором (разностью плотностей нагретого и охлажденного теплоносителя) и гидравлическим сопротивлением контура. Расход охлаждающей воды влияет на интенсивность теплосъема: чем он больше, тем ниже температура теплоносителя на выходе из охладителя и тем больше движущий напор. При быстром изменении расхода в контуре возникают колебания, которые могут перейти в автоколебания, вплоть до срыва циркуляции.

Ключевые параметры маневрирования. На основе анализа экспериментальных исследований, проведенных в диссертации [Текст диссертации, стр. 37-56], можно выделить следующие параметры, которые варьировались для изучения отклика системы:

1. Тепловая мощность. В экспериментах мощность нагревателя варьировалась в диапазоне от 1,5 кВт до 5 кВт. Испытания проводились на уровнях 1,5; 2; 2,5 и 3 кВт, так как при мощности свыше 3,5 кВт начинают интенсифицироваться процессы кипения, что выходит за рамки первого этапа исследований.

2. Внешние динамические воздействия (качка). Для моделирования судовой качки использовался кривошипно-шатунный механизм, обеспечивающий период колебаний 3 секунды с полуамплитудой 15 градусов. Это соответствует требованиям Морского регистра.

3. Расход охлаждающей воды. Расход воды в холодильнике мог варьироваться в широком диапазоне, что позволяло моделировать различные режимы теплосъема.

4. Начальные условия. В качестве начальных условий фиксировались: изотермическое состояние контура (расход равен нулю, температуры одинаковы), уровень заполнения контура и температура окружающей среды.

Математическое описание. Для анализа маневрирования использовалась система уравнений, описывающих баланс массы, энергии и импульса в контуре. Уравнение движения связывает движущий напор с гидравлическим сопротивлением. Уравнение энергии описывает изменение температуры во времени. Решение этой системы позволяет прогнозировать отклик контура на внешние воздействия.

Вывод по разделу: Определены ключевые параметры маневрирования (мощность, амплитуда и частота качки, расход охлаждения), которые позволяют всесторонне исследовать устойчивость ЕЦ.

5. Изучить методы и режимы маневрирования расходом охлаждающей воды.

Методика проведения экспериментов по маневрированию расходом охлаждающей воды основывается на комплексном подходе, сочетающем физический эксперимент на стенде и численное моделирование.

Экспериментальная установка. Исследования проводились на стенде, сконструированном на базе лаборатории теплофизических исследований НГТУ им. Р.Е. Алексеева [Текст диссертации, стр. 37-40]. Стенд представляет собой замкнутый контур, включающий:

· Нагревательный участок (имитатор активной зоны) с нихромовым нагревателем.

· Холодильник коаксиального типа (труба в трубе).

· Расширительную емкость (буферный бак).

· Узел качания для моделирования внешних динамических воздействий.

· Систему измерения (термопары, датчики давления, расходомеры).

Режимы маневрирования. В работе исследовались два основных режима:

1. Статический режим (без качки). Стенд находится в вертикальном положении. Этот режим является базовым для сравнения.

2. Динамический режим (с качкой). Стенд совершает осцилляции в одной плоскости с заданными параметрами (период 3 с, полуамплитуда 15°).

Методы обработки данных. Для анализа полученных данных использовались:

· Метод сосредоточенных параметров (метод Лагранжа). Позволяет описать тепловые процессы в каждом элементарном участке контура с помощью обыкновенных дифференциальных уравнений.

· Спектральный анализ. Применялся для выявления частот колебаний массового расхода и температуры.

· Статистический анализ. Использовался для оценки среднеквадратичного отклонения и автокорреляции параметров.

Анализ устойчивости. Для оценки устойчивости контура при маневрировании задавалось периодическое возмущение, моделирующее действие внешних динамических сил (центробежных и силы Кориолиса). Анализ решения системы уравнений позволил определить критические амплитуды и частоты воздействия, при которых в системе наблюдается потеря устойчивости (например, при полуамплитуде силы 50 Н и частоте свыше 10 $с^{-1}$).

Вывод по разделу: Разработанная методика и выбранные режимы маневрирования позволяют получить количественные оценки влияния внешних динамических сил на теплогидравлические характеристики контура с ЕЦ и выявить границы его устойчивой работы.

6. Провести серию экспериментов на стенде ФТ-101 при различных режимах изменения расхода охлаждающей воды.

Экспериментальная установка ФТ-101 представляет собой замкнутый контур естественной циркуляции, выполненный из трубы внутренним диаметром 61 мм. В состав стенда входят: обогреваемый подъёмный участок, охлаждаемый водопроводной водой опускной участок, бак компенсации объёма с иллюминаторами, система температурного контроля на базе термопар,

система заполнения и осушения, а также система энергоснабжения и управления. Стенд работает при атмосферном давлении (с возможностью модернизации до 6 атм) и позволяет исследовать ЕЦ как за счёт разности плотностей, так и за счёт кипения теплоносителя.

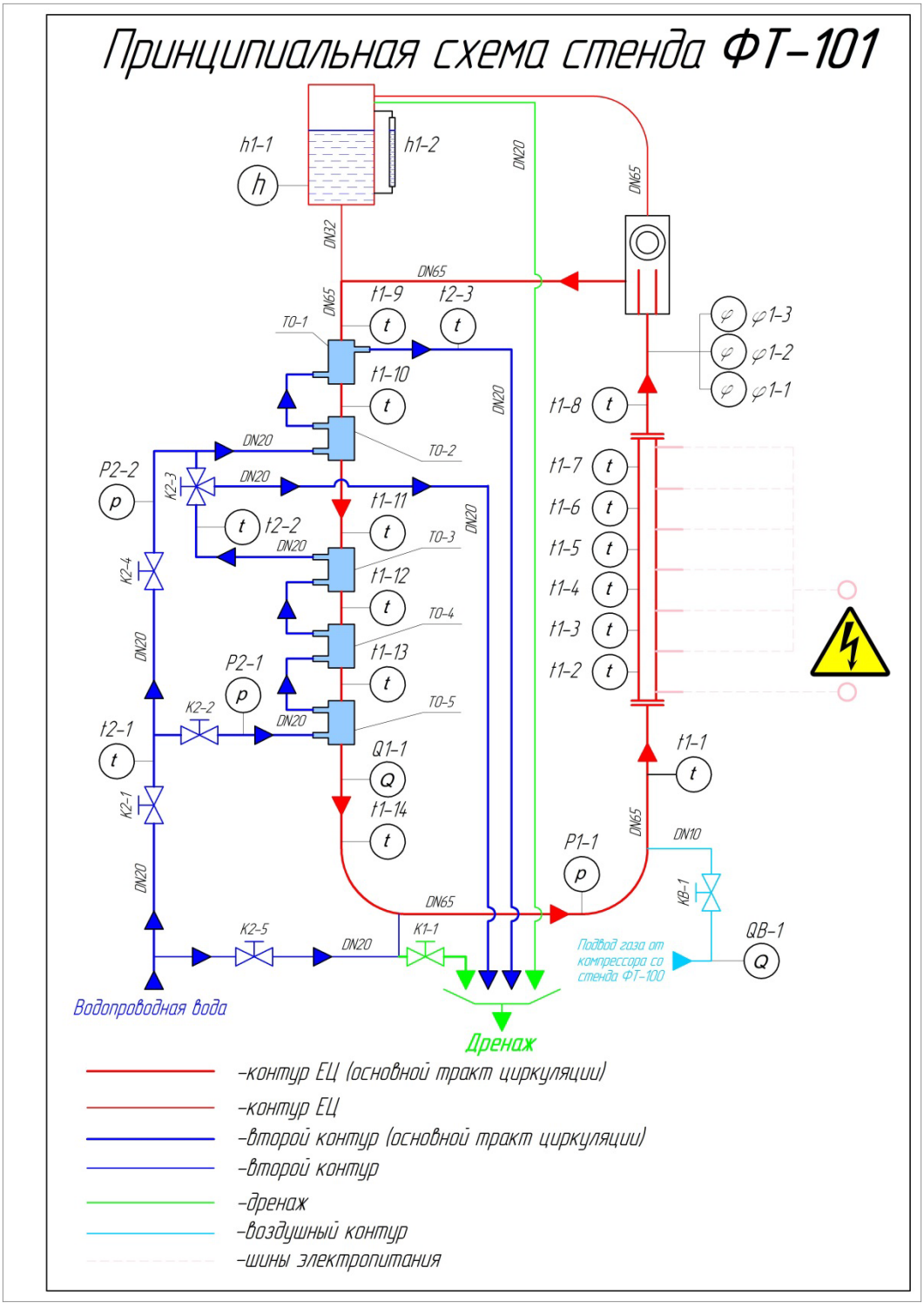


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Для планирования экспериментов используется набор дискретных стационарных состояний стенда, охватывающий диапазон тепловых мощностей от 5 до 10 кВт и расходов охлаждающей воды во втором контуре 0,25; 0,5 и 1 кг/с. В каждом режиме фиксируются температуры теплоносителя на входе и выходе нагревательного участка (t1, t2), температуры на входе и выходе холодильника (t3, t4), температуры охлаждающей воды (t5, t6) и массовый расход теплоносителя в контуре (M).

Таблица 1- Набор дискретных стационарных состояний стенда ФТ-101

Мощность, кВт	Расход воды 2 контура, кг/сек	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6	M
10	0,25	-*	-*	-*	-*	-*	-*	-*
	0,5	75,9	81,6	82,1	75,6	10	14,8	0,427
	1	66,6	72,4	72,9	66	10	12,4	0,417
9,5	0,25	92,11	97,3	98,2	91,11	10	19,1	0,435
	0,5	73,4	78,8	79,8	73,3	10	14,6	0,422
	1	64,7	70,22	71,12	64,6	10	12,3	0,413
9	0,25	87,7	92,7	93,4	87,6	10	18,6	0,43
	0,5	70,9	76,1	76,7	70,5	10	14,3	0,417
	1	62,8	68	68,1	62,1	10	12,2	0,408
8,5	0,25	83,6	88,4	89,4	83,1	10	18,2	0,425
	0,5	68,4	73,3	74,1	68,1	10	14,1	0,412
	1	60,1	65,8	66,5	59,9	10	12	0,404
8	0,25	79,7	84,2	84,7	79	10	17,7	0,42
	0,5	65,9	70,6	71,1	65,2	10	13,8	0,407
	1	58,8	63,6	64,1	58,6	10	11,9	0,399
7,5	0,25	76	80,4	81,1	75,2	10	17,2	0,415
	0,5	63,3	67,8	68,4	62,6	10	13,6	0,402
	1	56,7	61,3	61,9	55,8	10	11,8	0,395

7	0,25	72,4	76,5	76,6	72,3	10	16,7	0,409
	0,5	60,8	65	65,7	60	10	13,4	0,397
	1	54,6	58,9	59,6	54	10	11,7	0,39
6,5	0,25	69	72,8	73,7	68,4	10	16,2	0,403
	0,5	58,2	62,2	62,4	57,7	10	13,1	0,392
	1	52,4	56,5	57	52	10	11,6	0,385
6	0,25	65,4	69	69,3	65,3	10	15,8	0,397
	0,5	55,5	59,2	59,5	55,2	10	12,9	0,387
	1	50,2	53,4	54,1	49,6	10	11,4	0,381
5,5	0,25	61,8	65,2	66	61	10	15,3	0,391
	0,5	52,8	56,2	56,9	52,1	10	12,6	0,381
	1	47,8	51,3	52,2	47,7	10	11,3	0,376
5	0,25	58,1	61,3	61,5	57,3	10	14,8	0,385
	0,5	49,9	53,1	53,4	49,5	10	12,4	0,376
	1	45,4	48,6	49,3	44,6	10	11,2	0,371

Примечания:

* Работа в данном режиме не рекомендуется, так как на исследуемые процессы существенно влияет наличие паровой фазы, обусловленной развитым кипением на обогреваемой поверхности

Эксперименты проводятся в два этапа. На первом этапе исследуются статические режимы, при которых расход охлаждающей воды поддерживается постоянным, а система выводится на стационарное состояние. На втором этапе реализуется маневрирование расходом: ступенчатое изменение (мгновенное открытие или закрытие регулирующей арматуры), а также плавное линейное изменение с различной скоростью. Каждый эксперимент повторяется не менее трёх раз для обеспечения воспроизводимости. Особое внимание уделяется переходным процессам — фиксируется время выхода на новый стационарный режим, амплитуда колебаний температуры и расхода, наличие обратных токов.

7. Проанализировать влияние маневрирования расходом охлаждающей воды на устойчивость естественной циркуляции.

Анализ устойчивости базируется на математической модели контура ЕЦ, включающей уравнение движения жидкости (закон сохранения количества движения), уравнение движущего напора, уравнения теплового баланса для нагревательного и охлаждаемого участков, уравнения динамического запаздывания, уравнение потери напора по Дарси–Вейсбаху и выражение для коэффициента теплопередачи. Система уравнений замыкается и решается численно относительно времени.

На основе экспериментальных данных, полученных в задаче 6, проводится численное моделирование переходных процессов. Рассматриваются следующие сценарии воздействия:

· ступенчатое снижение расхода охлаждающей воды на 10, 20 и 30 % от номинала;
· ступенчатое увеличение расхода на те же величины;
· линейное изменение расхода с различной скоростью (медленное, среднее, быстрое);
· наложение внешних динамических воздействий, моделирующих качку.

Для каждого сценария определяются: время восстановления стационарного режима, амплитуда и частота возникающих колебаний, максимальное отклонение массового расхода и температуры от средних значений. Строятся карты устойчивости в координатах «тепловая мощность — расход охлаждающей воды», на которых выделяются области устойчивой работы, области автоколебаний и области срыва циркуляции. Выявляются критические значения расхода, при которых система теряет устойчивость.

8. Оценить возможности применения полученных результатов для систем безопасности реакторных установок.

Полученные экспериментальные данные и результаты численного моделирования позволяют сформулировать практические рекомендации для обоснования безопасности пассивных систем отвода тепла (СПОТ, САОТ, САРХ). Прежде всего, они могут быть использованы для верификации теплогидравлических кодов, применяемых при расчётном обосновании этих систем. Сравнение расчётных и экспериментальных данных по температурам и массовому расходу позволяет оценить погрешность кодов и определить границы их применимости.

Кроме того, результаты работы позволяют оценить запасы устойчивости контуров ЕЦ в аварийных режимах. Если при маневрировании расходом охлаждающей воды система сохраняет устойчивость с запасом, это подтверждает надёжность пассивного отвода тепла. Если же выявляются опасные режимы, они должны быть учтены при проектировании.

Отдельно рассматривается возможность использования информационной модели стенда ФТ-101 как прототипа цифрового двойника реального контура ЕЦ. Цифровой двойник позволяет в реальном времени отслеживать состояние системы, прогнозировать развитие аварийных процессов и вырабатывать рекомендации по управлению.

9. Систематизировать данные о конструкции стенда ФТ-101 для построения информационной модели.

Информационная модель (BIM) представляет собой цифровое описание объекта, которое содержит геометрические и атрибутивные данные обо всех его элементах. Для контура с естественной циркуляцией такая модель позволяет отслеживать состояние оборудования, накапливать данные

экспериментов и использовать их для расчётного обоснования систем безопасности.

Основой для построения информационной модели стенда ФТ-101 является перечень атрибутов, приведённый в отчёте. В таблице указаны все ключевые элементы контура с их характеристиками: термопары, измеритель, трансформатор, холодильник, теплоизоляция, окно визуализации, нагревательный и охлаждаемый участки, бак компенсации объёма.

Таблица 2 – Перечень атрибутов для отображения стенда ФТ-101

Объект	фото	Параметр	Значение
Термопара чехловая		Тип	ТХК
		Стандарт	ГОСТ Р 8.585-2001
		материал проводников	хромель-копель
		Диапазон температур	-200^{0}С до +800^{0}С
		Погрешность	0,5 ^{0}С
Термопара поверхностная		Тип	ТХК
		Стандарт	ГОСТ Р 8.585-2001
		материал проводников	хромель-копель
		Диапазон температур	-200^{0}С до +800^{0}С
		Погрешность	0,5 ^{0}С
Измеритель РМТ490		Количество каналов	3
		Назначение	Преобразование первичного сигнала с датчика температуры
Трансформатор РОТ-25/5		Назначение	Регулировочный и стабилизирующий
		Охлаждение	естественное воздушное охлаждение

		Тип	Трехфазный
		Назначение	Изменение (набор) электрической мощности для подачи на нагревательный участок
Холодильник труба в трубе		Диаметр наружной трубы	0,092м
		Длина между торцами фланцевых соединений	0,4м
		Количество	5
		Теплоноситель	Вода
		Материал	Сталь 0Х18Н10Т
		Стандарт	ГОСТ 5632-2014
Теплоизоляция		Материал	Каменная вата+ алюминиевая фольга с армированием
		Толщина	0,05м
		Местоположение	Нагревательный участок контура циркуляции
Окно визуализации		материал	Стекло кварцевое
		Диаметр	0,105м
		Назначение	Визуализация происходящих процессов в контуре

Бак компенсации объема		Материал	Сталь 0Х18Н10Т
		Оснащение	Водомерное стекло+сигнализатор уровня
		Назначение	Компенсация объема
Сигнализатор уровня		Предназначение	Предупредительная и аварийная сигнализация по отсутствию теплоносителя в баке
		Тип	акустический
		Материал	Сталь 12Х18Н10Т
* Нагревательный участок скрыт под слоем теплоизоляции, представляет собой трубопровод из стали аустенитного класса. ** Охлаждаемый участок скрыт под пятью секциями холодильника, представляет собой трубопровод из стали аустенитного класса			

Каждый элемент модели описывается набором параметров. Для термопар указываются тип (ТХК), стандарт (ГОСТ Р 8.585-2001), материал проводников (хромель-копель), диапазон температур (–200…+800 °C) и погрешность (0,5 °C). Для измерителя РМТ490 — количество каналов (3) и назначение. Для трансформатора РОТ-25/5 — назначение, тип охлаждения и количество фаз. Для холодильника — диаметр наружной трубы (0,092 м), длина (0,4 м), количество секций (5), материал (сталь 0Х18Н10Т). Для нагревательного и охлаждаемого участков — внутренний и наружный диаметры, длина, материал.

Такая систематизация позволяет создать единую базу данных по стенду, которая может использоваться как для мониторинга в реальном времени, так и

для накопления результатов экспериментов. В дальнейшем эта база может быть интегрирована с математической моделью контура.

10. Обобщить результаты экспериментов и представить их в виде, пригодном для практического использования.

По завершении экспериментов на стенде ФТ-101 проводится обобщение полученных данных. Цель — представить результаты в виде, который может быть использован для оценки устойчивости естественной циркуляции и для обоснования безопасности пассивных систем отвода тепла.

Обобщение проводится по нескольким направлениям. Во-первых, строятся сводные таблицы, в которых для каждого режима (мощность от 5 до 10 кВт, расход охлаждения 0,25; 0,5; 1 кг/с) указаны средние значения температур t1–t6 и массового расхода M. Эти таблицы позволяют сравнивать статические и динамические режимы и выявлять влияние маневрирования расходом.

Во-вторых, строятся графики зависимостей массового расхода от тепловой мощности для каждого значения расхода охлаждающей воды. Эти графики показывают, как изменяется интенсивность циркуляции при увеличении мощности и при изменении условий теплосъёма.

В-третьих, формируются карты устойчивости в координатах «мощность — расход охлаждения». На этих картах выделяются области устойчивой работы, области колебаний и области срыва циркуляции. Такие карты являются практическим инструментом для проектировщиков систем безопасности.

В-четвёртых, результаты экспериментов сравниваются с данными, полученными при численном решении математической модели. Совпадение расчётных и экспериментальных данных подтверждает адекватность модели и позволяет использовать её для прогнозирования поведения контура в условиях, которые не исследовались экспериментально.

Полученные результаты оформляются в виде отчёта, содержащего таблицы, графики и карты устойчивости. Эти материалы могут быть использованы при проектировании и расчётном обосновании систем пассивного отвода тепла (СПОТ, САОТ, САРХ) реакторных установок.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы было проведено комплексное исследование естественной циркуляции теплоносителя в контуре с пассивными системами безопасности реакторных установок. Работа включала теоретический обзор, анализ существующих систем безопасности, экспериментальные исследования на стенде ФТ-101, а также численное моделирование процессов тепломассопереноса.

Была исследована история развития естественной циркуляции теплоносителя от первых систем отопления XVIII века до современных пассивных систем безопасности ядерных энергетических установок. Установлено, что естественная циркуляция прошла путь от простого физического явления до одного из ключевых принципов обеспечения безопасности современных реакторов, включая ВВЭР, BWR, БН и малые модульные реакторы.

Был изучен принцип естественной циркуляции и её роль в системах безопасности. Показано, что движущей силой ЕЦ является разность плотностей нагретого и охлаждённого теплоносителя, а интенсивность циркуляции зависит от тепловой мощности, высоты контура и гидравлического сопротивления. Рассмотрены преимущества ЕЦ (автономность, надёжность, простота, самозащита) и её ограничения (чувствительность к геометрии, возможность неустойчивых режимов).

Проанализированы системы безопасности различных типов реакторов, основанные на естественной циркуляции. Рассмотрена эволюция пассивных систем отвода тепла для судовых ЯЭУ, реакторов на быстрых нейтронах (БН-600, БН-800, БН-1200) и водо-водяных реакторов (ВВЭР-ТОИ, АЭС-2006, AP1000). Показано, что для всех типов реакторных установок характерно использование ЕЦ в качестве основного механизма аварийного отвода тепла.

Определены параметры маневрирования расходом охлаждающей воды. Установлено, что ключевыми параметрами являются тепловая мощность, амплитуда и частота внешних динамических воздействий, а также расход

охлаждающей воды. Показано, что при уменьшении расхода охлаждения температура теплоносителя растёт, разность плотностей падает, и циркуляция ослабевает, что может привести к срыву циркуляции.

Изучены методы и режимы маневрирования расходом охлаждающей воды. Рассмотрены статический и динамический режимы работы стенда. Для динамического режима задавались параметры качки: период колебаний 3 секунды с полуамплитудой 15 градусов. Описаны методы обработки данных: метод сосредоточенных параметров, спектральный анализ, статистический анализ.

Проведена серия экспериментов на стенде ФТ-101 при различных режимах изменения расхода охлаждающей воды. Экспериментальная установка представляет собой замкнутый контур естественной циркуляции с внутренним диаметром трубы 61 мм. Испытания проводились при тепловых мощностях от 5 до 10 кВт и расходах охлаждающей воды 0,25; 0,5 и 1 кг/с. В каждом режиме фиксировались температуры теплоносителя на входе и выходе нагревательного участка и холодильника, температуры охлаждающей воды и массовый расход.

Проанализировано влияние маневрирования расходом охлаждающей воды на устойчивость естественной циркуляции. На основе экспериментальных данных и математической модели проведено численное моделирование переходных процессов. Рассмотрены сценарии ступенчатого и линейного изменения расхода, а также наложения внешних динамических воздействий. Построены карты устойчивости в координатах «тепловая мощность — расход охлаждающей воды», на которых выделены области устойчивой работы, автоколебаний и срыва циркуляции.

Оценены возможности применения полученных результатов для систем безопасности реакторных установок. Показано, что полученные данные могут быть использованы для верификации теплогидравлических кодов, применяемых при расчётном обосновании пассивных систем отвода тепла (СПОТ, САОТ, САРХ). Результаты работы позволяют оценить запасы

устойчивости контуров ЕЦ в аварийных режимах и подтвердить надёжность пассивного отвода тепла.

Систематизированы данные о конструкции стенда ФТ-101 для построения информационной модели. Разработан перечень атрибутов для основных элементов контура: термопар, измерителя, трансформатора, холодильника, теплоизоляции, окна визуализации, нагревательного и охлаждаемого участков, бака компенсации объёма.

Обобщены результаты экспериментов и представлены в виде, пригодном для практического использования. Построены сводные таблицы, графики зависимостей массового расхода от тепловой мощности и карты устойчивости. Результаты экспериментов сравнены с данными численного моделирования, что подтверждает адекватность модели.

Таким образом, цель работы — исследование естественной циркуляции теплоносителя на стенде при маневрировании расходом охлаждающей воды и применение полученных данных к системам безопасности реакторных установок — достигнута. Практическая значимость работы заключается в том, что полученные данные могут быть использованы при проектировании и расчётном обосновании пассивных систем отвода тепла ядерных энергетических установок.

Список литературы

Перечень интернет ресурсов:

1.https://www.stout.ru/articles/samotechnaya-sistema-otopleniya-vse-chto-nuzhno-znat/

2.https://m-strana.ru/articles/otoplenie-bez-nasosa/?ysclid=mustsv4u6725898495

3.https://mosvodostroy.ru/blog/sistema-otopleniya-s-estestvennoj-tsirkulyatsiej/?ysclid=mustt6qi7560307046

4.https://www.c-o-k.ru/articles/sistema-otopleniya-estestvennaya-cirkulyaciya-teplonositelya

5.https://www.otivent.com/sistema-otoplenija-s-estestvennoj-cirkuljaciej

Перечень литературы:

А.Я. Благовещенский, И.В. Кутузов, А.Г. Митрюхин, В.Л. Леонтьева, В.Н. Митюков «Естественная циркулярия однофазного теплоносителя»

Л.М. Махов «Отопление»

С.П. Алехичев, Г.В. Калабин «Естественная тяга и тепловой режим рудников»