Некоммерческое акционерное общество «Университет имени Шакарима города Семей»

УДК 621.039.5

На правах рукописи

# СУРАЕВ АРТУР СЕРГЕЕВИЧ

# Исследование характеристик расчетной модели газоохлаждаемого реактора с водным замедлителем

6D072300 – Техническая физика

Диссертация на соискание степени доктора философии (PhD)

Научные консультанты

д.ф.-м.н., профессор М.К. Скаков (РК) д.ф.-м.н., профессор Э.Г. Батырбеков (РК)

Зарубежный научный консультант

dr. hab. inż., prof. Wojciech Wieleba (PII)

Республика Казахстан Семей, 2021

# СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР	
1.1 Реактор ВВЭР–1000 и способы увеличения его эффективности	
1.2 Развитие технологии ВТГР	
1.3 Воло-воляные реакторы с шариковыми микротвэлами.	
1.3.1 Проект FBNR	
1.3.2 Проект AFPR	
1.4 Постановка задачи	
2 МЕТОЛЫ ПРОВЕЛЕНИЯ ИССЛЕЛОВАНИЯ	
2.1 Классический полхол к расчету теплообменных аппаратов	
2.1.1 Общие свеления	
2.1.2 Тепловой расчет	
2.1.3 Расчет температурного режима	
2.1.4 Расчет коэффициента теплопередачи	
2.1.5 Гидравлический расчет	
2.2 Нейтронно-физический расчет характеристик активной зоны и	кампании
реактора	
2.2.1 Метод Монте-Карло для анализа нейтронно-физических хар	актеристик
активной зоны	
2.2.2 Применение метода Монте-Карло в программе МСNP	
2.2.3 Программа MC-Delta для расчета кампании реактора	
2.3. Теплофизический расчет характеристик теплообменного оборудо	вания 37
2.3.1 Совершенствование классического метода расчета тепло	зобменных
аппаратов	
2.3.2 Метод конечных элементов	
2.3.3 Применение метода конечных элементов	
	молели
5 ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК РАСЧЕТНОИ ГАЗООХНАЖНАЕМОГО ВЕЛИТОРА С ВОЛИЦИМ ЗАМЕННИТЕНЕ	
1 АЗООХЛАЖДАЕМОГО РЕАКТОРА С ВОДНЫМ ЗАМЕДЛИТЕЛЕ 2.1. Особачило от исслетичники и основника исслетичники	LVI 41
2.2 Вознат и собствукции и основные характеристики	
5.2 Расчет неитронно-физических характеристик активно	ои зоны 42
Газоохлаждаемого реактора	
3.2.1 Модель активной зоны реактора для неитронно-физических расч	1eroB 45
3.2.2 Результаты неитронно-физических расчетов	
2.2.1 Анациа полиции и розуни тотор расного разностор ситирией сог	
3.2.4 Анализ полученных результатов расчета вариантов активной 301 3.2.5 Распет уарактеристик модериценованией ТРС	וםב. JI גע געריייייייייייייייייייייייייייייייייי
3.2.5 гасчет характеристик модернизированной ТВС	
э.э выводы по разделу	

4 ТЕПЛООБМЕННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ	АЭС	HA	OCHOBE
ГАЗООХЛАЖДАЕМОГО РЕАКТОРА			
4.1 Пути передачи энергии в цикл Ренкина			
4.1.1 Характеристики цикла Ренкина			
4.2 Особенности теплообменного оборудования			61
4.2.1 Теплообменные аппараты			61
4.2.2 Турбина			
4.3 Расчет характеристик теплообменного оборуд	ования		
4.3.1 Теплофизический расчет теплообменников			
4.3.2 Расчет массово-габаритных характеристик			
4.3.3 Тепло-гидравлический анализ подогревателя	я методом в	конечны	х элементов
		• • • • • • • • • • • • • • • •	
4.4 Сравнение основных параметров		• • • • • • • • • • • • • • •	
4.4.1 Сравнение с ВВЭР		••••••••••	
4.4.2 Сравнение с мировыми проектами ВТГР	,	• • • • • • • • • • • • • • • •	69
4.5 Выводы по разделу		• • • • • • • • • • • • • • • •	
5 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ИСС	СЛЕДОВА	ния пі	РОЦЕССОВ
ПАРООБРАЗОВАНИЯ И ПЕРЕГРЕВА ПАРА		•••••••••	71
5.1 К вопросу использования тонкостенных тепло	обменных	трубок.	71
5.2 Предпосылки к созданию установки		••••••••••	72
5.3 Установка с U-образным трактом		••••••	75
5.3.1 Конструкция установки		••••••	75
5.3.2 Расчетное обоснование конструкции		••••••••••	77
5.4 Установка с прямым трактом		••••••••••	
5.4.1 Конструкция установки		••••••••••	
5.4.2 Расчетное обоснование конструкции установ	вки и режи	мов ее ра	аботы 83
5.5 Проведение пуско-наладочных работ		•••••	
5.6 Процедура выполнения работ на установке		••••••••••	
5.7 Результаты экспериментов		••••••••••	
5.8 Выводы по разделу		• • • • • • • • • • • • • • •	101
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	•••••	•••••	
CHUCOK UCHOTL3OBAHHLIY UCTOUHUKOB			105
CHINCOR MCHOIDSODAIHIDIA MCTO-IIIMROD	•••••	••••••	
ПРИЛОЖЕНИЕ А			
ПРИЛОЖЕНИЕ Б			
ПРИЛОЖЕНИЕ В			
ПРИЛОЖЕНИЕ Г			

# ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

МОН РК	_	Министерство образования и науки Республики
		Казахстан
ИАЭ НЯЦ РК	_	Институт атомной энергии Национального ядерного
		центра Республики Казахстан
TBC	_	Тепловыделяющая сборка
ТВЭЛ	_	Тепловыделяющий элемент
МКЭ		Метод конечных элементов
АЭС	_	Атомная электростанция
ТЭС	_	Тепловая электростанция
ВВЭР	_	Водо-водяной энергетический реактор
ГОР	—	Газоохлаждаемый реактор
МАГАТЭ	_	Международное агентство по атомной энергетике
КПД	_	Коэффициент полезного действия
КИУМ	_	Коэффициент использования установленной
		мощности
ΒΤΓΡ	_	Высокотемпературный газоохлаждаемый реактор
PBMR	_	Pebble-bed modular reactor
THTR	_	Thermal high temperature reactor
MOX	_	Mixed oxide $(UO_2+PUO_2)$
VER	_	Ядерная энергетическая установка
MCNP	_	Monte Carlo N-particle
CANDU	_	Canadian deuterium uranium reactor
ИУС	—	Информационно-управляющая система

# введение

#### Актуальность темы исследования

Развитие атомной энергетики, основанной на реакторах с тепловым спектром нейтронов, возможно только при условии увеличения эффективности реакторных АЭС проектируемых установок И путем технического совершенствования оборудования снижения капитальных затрат И на строительство энергоблоков. Дальнейшее следование по пути развития технологии водо-водяных корпусных реакторов на тепловых нейтронах скорее всего приведет к неконкурентоспособности атомной энергетики, также, как и разработка новых малоизученных технологий. Для поддержания развития атомной энергетики необходимы проекты, которые смогут доказать свою эффективность в нынешних условиях рынка. К такому выводу приходят многие современные ученые и предлагают свои пути выхода из сложившейся ситуации.

В данной диссертационной работе в качестве такой альтернативы предлагается канальный газоохлаждаемый реактор с водным замедлителем и циклом Ренкина. Уникальность такого типа реакторной установки обусловлена тем, что предлагаемая конфигурация совмещает в себе лучшие характеристики высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов и проверенных временем водо-водяных энергетических реакторов. При этом, ряд технических и конструкционных особенностей позволяет не только достичь высокой эффективности, но и существенно снизить капитальные затраты на строительство и обслуживание.

В рамках данной научной исследовательской работы предлагаются технические решения способные в существенной мере увеличить эффективность реакторного и теплообменного оборудования и при этом уменьшить капитальные затраты на строительство энергоблоков.

### Цель работы

Целью диссертационной работы является исследование возможности повышения эффективности и конкурентоспособности атомной энергетики путем разработки высокоэффективного газоохлаждаемого реактора с водным замедлителем.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

– разработать расчетную модель активной зоны газоохлаждаемого реактора для проведения серии нейтронно-физических расчетов и расчетов характеристик кампании реактора;

– разработать расчетную модель теплообменного оборудования первого контура для проведения теплофизических расчетов;

– провести необходимые нейтронно-физические расчеты активной зоны реактора и теплофизические расчеты теплообменного оборудования;

– разработать конструкцию экспериментальной установки исследования процессов парообразования и перегрева пара в едином контуре АЭС;

– провести необходимые экспериментальные работы на установке;

– проанализировать полученные экспериментальные данные;

– сравнить характеристики газоохлаждаемого реактора и теплообменного оборудования с аналогичными характеристиками реакторов типа ВВЭР-1000 и ВТГР.

#### Основные положения, выносимые на защиту

 – Расчетная модель газоохлаждаемого реактора для нейтронно-физических расчетов и нейтронно-физические характеристики активной зоны реактора;

– Усовершенствованные теплофизические характеристики модернизированной конструкции теплообменного оборудования;

– Установка исследования процессов парообразования и перегрева пара.

#### Научная новизна

Научная новизна результатов данного диссертационного исследования заключается в следующем:

– впервые разработана нейтронно-физическая расчетная модель газоохлаждаемого реактора с водным замедлителем и тепловая модель оборудования первого контура для выполнения комплексных расчетов;

– предложена уникальная схема АЭС на основе газоохлаждаемого реактора с водным замедлителем;

– предложена модернизированная конструкция теплообменного оборудования первого контура;

– впервые разработаны устройство и проведены экспериментальные исследования процесса образования и перегрева пара в тонкостенной теплообменной трубке, моделирующей единый контур АЭС на основе газоохлаждаемого реактора.

### Объект исследования

Теплообменные процессы, протекающие в оборудовании первого контура АЭС на основе газоохлаждаемого реактора с водным замедлителем.

#### Предмет исследования

Нейтронно-физические и теплофизические характеристики расчетной модели газоохлаждаемого реактора с водным замедлителем, теплообменного оборудования первого контура и экспериментальной установки исследования процессов парообразования и перегрева пара.

#### Методы исследования

В диссертационной работе были применены как общенаучные, так и специальные методы исследования. К специальным методам исследования экспериментальное относятся: расчетное И исследование процессов, протекающих в теплообменном оборудовании первого контура АЭС на основе замедлителем; компьютерное газоохлаждаемого реактора с водным моделирование сложных теплофизических процессов, происходящих в тепловом оборудовании газоохлаждаемого реактора с водным замедлителем.

## Практическая значимость

Разработана расчетная модель газоохлаждаемого реактора с водным замедлителем для нейтронно-физических расчетов и расчета кампании реактора.

Расчетным путем обоснована усовершенствованная конструкция тепловыделяющей сборки без теплового экрана.

Предложенная эффективная конструкция теплообменного оборудования первого контура АЭС, в частности подогревателя питательной воды и парогенератора, которая позволит привлечь внимание заводов изготовителей к альтернативным подходам при проектировании данного оборудования.

Разработана экспериментальная установка исследования процессов парообразования и перегрева пара в едином контуре. Проведены практические исследования, доказывающие правильность теоретических предположений.

Полученные нейтронно-физические и тепловые характеристики оборудования АЭС на основе газоохлаждаемого реактора с водным замедлителем послужат основой для развития данного типа реакторов в перспективе их использования в будущих проектах АЭС.

Акт о внедрении «Процедуры подготовки и проведения экспериментов», патент на полезную модель и «Протокол проведения испытаний на экспериментальной установке» приведены в Приложениях к настоящей диссертации.

# Личный вклад автора

Личный вклад автора заключается в постановке и формулировке задач исследования, проведении аналитического обзора литературных данных, проведении теоретических и расчетных исследований, разработке и создании установки образования и перегрева пара, подготовке и проведении пусконаладочных и экспериментальных работ, анализе и обработке полученных экспериментальных данных, разработке компьютерных расчетных моделей для нейтронно-физических и теплофизических расчетов, а также оптимизации классической методики проведения расчетных исследований характеристик теплообменного оборудования. Все работы проводились В тесном сотрудничестве со специалистами ИАЭ РГП НЯЦ РК. Анализ результатов, полученных в ходе проведения диссертационного исследования, а также формулировка основных выводов выполнены совместно с научными консультантами.

### Связь темы с планами научно-исследовательских программ

Значительная часть настоящей работы выполнена при финансовой поддержке Государственного учреждения «Комитет науки Министерства образования и науки Республики Казахстан» в рамках Договора №271 от 12.02.2015 года по теме «АЭС на основе газоохлаждаемого реактора с водным замедлителем» на 2015-2017 гг.

Степень обоснованности и достоверности результатов, полученных в работе, обеспечивается корректностью, точностью и оригинальностью поставленных задач, применением хорошо апробированных общенаучных методов исследования и экспериментальных методик, большим объемом полученных расчетных и экспериментальных данных, их статистической обработкой и сопоставлением полученных данных с ранее опубликованными результатами исследований известных ученых СНГ и дальнего зарубежья.

Основные результаты диссертации опубликованы в изданиях, рекомендованных Комитетом по обеспечению качества в сфере образования и науки МОН РК, а также рецензируемых зарубежных научных журналах, входящих в базу данных Scopus.

# Апробация результатов работы

Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на семи международных конференциях:

1. VII Eurasian conference «Nuclear Science and Its Application», Institute of Radiation Problems Azerbaijan National Academy of Sciences (Baku, Azerbaijan, October 21-24, 2014);

2. Х Международная конференция «Ядерная и радиационная физика», Национальный ядерный центр РК (г. Курчатов, Казахстан, 8-11 сентября 2015 г.);

3. International conference «21 Century: Nuclear technologies and Nonproliferation problems» (Astana, Kazakhstan, 2015, October 7–9);

4. VIII Международная научно-практическая конференция «Физикотехнические проблемы в науке, промышленности и медицине», Физикотехнический институт НИТПУ (г. Томск, Россия, 1-3 июня 2016 г.);

5. Научно-техническая конференция «Нейтронно-физические проблемы ядерной энергетики» (г. Обнинск, Россия, 12–16 октября 2015 г.);

6. XXIII Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика», Национальный исследовательский университет МЭИ (г. Москва, Россия, 2-3 марта 2017 г.);

7. Всемирный конгресс инженеров и ученых WSEC-2017 (Астана, Казахстан, 19-20 июня 2017 г.);

8. VIII Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы урановой промышленности (г. Астана, Казахстан, 03-05 августа 2017 г.);

9. Semipalatinsk test site: Legacy and Prospects for Scientific and Technical Potential Development (September 11-13, 2018, Kurchatov, Republic of Kazakhstan);

А также на шести конференциях-конкурсах и научных школах:

1. XIII Конференция-конкурс НИОКР молодых ученых и специалистов РГП НЯЦ РК, Национальный ядерный центр РК, (г. Курчатов, Казахстан, 14-16 мая 2014 г.);

2. XIV Конференция-конкурс НИОКР молодых ученых и специалистов РГП НЯЦ РК, Национальный ядерный центр РК (г. Курчатов, Казахстан,13-15 мая 2015 г.);

3. Научно-техническая конференция «Нейтронно-физические проблемы ядерной энергетики» (Обнинск, Россия, 12–16 октября 2015 г.);

4. XV Конференция-конкурс НИОКР молодых ученых и специалистов РГП НЯЦ РК, Институт атомной энергии НЯЦ РК (г. Курчатов, Казахстан,18-20 мая 2016 г.);

5. XIV Курчатовская междисциплинарная молодежная научная школа (г. Москва, Россия, 8-11 ноября 2016 г.);

6. Х международная школа-семинар молодых ученых и специалистов «Энергосбережение. Теория и практика» (г. Москва, Россия, 19-23 октября 2020 г.);

Также основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на научных семинарах кафедры технической физики и теплоэнергетики, на объединенных научных семинарах Инженернотехнологического факультета ГУ имени Шакарима города Семей и на научнотехнических советах Института атомной энергии Национального ядерного центра Республики Казахстан и на семинарах PhD-студентов во Вроцлавском политехническом университете (г. Вроцлав, Польша).

## Публикации

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 25 печатных работах, из них: 1 статья входит в базу данных Scopus, 4 публикации в изданиях, рекомендованных Комитетом по обеспечению качества в сфере образования и науки МОН РК.

# Структура и объем диссертации

Работа состоит из введения, пяти разделов, заключения и списка использованных источников. Она изложена на 118 страницах, содержит 42 рисунка, 36 таблиц и список использованных источников из 109 наименований.

В представленной ниже главе представлен аналитический обзор литературы, посвященной исследованиям в области поиска путей развития нейтронах. Показаны атомной энергетики на тепловых особенности конструкции, характеристики, преимущества и недостатки рассматриваемых типов реакторов. Представлено мнение авторов в вопросах увеличения эффективности, существующих и проектируемых АЭС, их экономической Предложены способы рентабельности. улучшения характеристик распространенных реакторов типа ВВЭР, а также рассмотрены другие возможные направления развития атомной энергетики. На основе анализа литературных данных [1–27] выполнена постановка задач исследования.

# 1.1 Реактор ВВЭР-1000 и способы увеличения его эффективности

В настоящее время из всего разнообразия реакторов на тепловых нейтронах развитие и распространение получили только несколько их типов: водо-водяные реакторы с водой под давлением (BBЭР-1000, PWR [1]), кипящие ABWR [2], тяжеловодные (CANDU [3], AHWR), и высокотемпературные с газовым теплоносителем ВТГР [4] и HTGR [5].

Наибольшее распространение в мире имеют реакторы с водой под давлением (рисунок 1). На данный момент из 450 действующих энергетических ректоров 294 являются реакторами с водой под давлением. Более того, если говорить о строящихся энергоблоках, которых насчитывается 55, то и здесь преимущественное большинство базируются на технологии водо-водяных реакторов – 45 проектов [6].



1 – реактор, 2 – парогенератор, 3 – главный циркуляционный насос, 4 – компенсатор давления, 5 – холодный коллектор, 6 – горячий коллектор, 7 – накопитель, 8 – предохранительные клапаны, 9 – конденсатор, 10 – паропровод.
 Рисунок 1 – Схема ВВЭР-1000 (V-466B) [7]

Такая статистика говорит о том, что технология их производства и эксплуатации хорошо отработана, они надежны, безопасны, имеют приемлемые экономические характеристики. Наиболее близкие к ним – реакторы с кипящей водой. Основное различие между ними состоит в месте, в котором происходит парообразование – в самом реакторе, или в дополнительном парогенераторе. Реакторы с водой под давлением имеют меньшие габариты и массу, кипящие – более простую технологическую схему, меньшее количество агрегатов. Совершенствование технологии и конструкции водо-водяных реакторов продолжается и далее [8,9].

В тяжеловодных реакторах, за счет меньшего поглощения нейтронов в дейтерии, возможно более эффективное использование урана. В реакторе CANDU доля использования природного урана достигает 1 %, против 0,7 % в ВВЭР. В большей части тяжеловодных реакторов в топливе используется природный уран в открытом цикле. Имеются варианты использования теплоносителя в виде тяжелой воды, легкой воды и газа. Однако больших различий в них нет, кроме различия в компенсации потерь дорогостоящей тяжелой воды. Особенность тяжеловодных реакторов заключается в наличии потерь тепловой энергии, уходящей в замедлитель, связанной с поддержанием малой температуры замедлителя.

В работе [10] показано, что водо-водяные энергетические реакторы на сегодняшний день являются самым распространенным типом реакторных устройств. Очевидные преимущества данного типа реакторов и накопленный огромный опыт их эксплуатации является поводом к продолжению их развития. Тем более, что эффективность энергоустановок, построенных на базе таких реакторов не высока и для самых современных на сегодняшний день АЭС не превышает 37% (проекты VVER-1000 V-466B, VVER-1200 V-392M, VVER-1500 V-448 и другие). В условиях современного свободного рынка энергии их экономическая эффективность неуклонно снижается. Это означает то, что атомная энергетика, основанная только на АЭС с реакторами типа BBЭP не сможет конкурировать по причине растущей нерентабельности. Выходом из этой ситуации может стать попытка увеличения рабочих параметров реакторного оборудования с целью достижения высокого КПД. Но и здесь есть свои сложности.

В работах [9,10,11] сделан акцент на то, что параметры повышения энергонапряженности должны выбираться на основе принципа разумной достаточности из доступных и возможных конструкционных материалов, и технологий изготовления оборудования, а также достигнутого уровня технического развития. Например, максимальное рабочее давление в корпусах ВВЭР-440 было выбрано 12,3 МПа именно исходя из возможностей изготовления корпусов во время создания первых реакторов данного типа.

Поэтому становится очевидным то, что увеличение толщины стенок корпусов реакторов и парогенераторов, а также их размеров не является решением проблемы. Современные корпуса реакторов типа ВВЭР-1000 и парогенераторов ПГВ-1000 имеют массу порядка 300 тонн каждый. За время их

эксплуатации (более 50 лет) разработано уникальное оборудование, предназначенное для их изготовления, транспортировки, монтажа и т.д. Конструирование корпуса, который сможет выдержать большее давление и температуру является практически невозможным, так как поставит вопрос о модернизации всей отрасли. В подтверждение этому можно привести слова автора в работе [10]: "увеличение эффективности использования АЭС за счет увеличения параметров теплоносителя будет не только не эффективным, а убыточным и нецелесообразным". Следовательно, необходим поиск других путей решения вопросов повышения эффективности использования АЭС.

В статье [12] рассмотрен вариант увеличения эффективности реакторной установки типа ВВЭР путем совершенствования процесса использования топлива. Эффект достигается за счет эксплуатации энергоблока на мощности, больше номинальной и увеличения длительности топливных загрузок до 18–24 месяцев. Автор уточняет: "повышение выработки электроэнергии на АЭС с ВВЭР-1000 достигается за счет увеличения мощности блоков до 104 % от номинальной и выше". Разумеется, такой подход может являться экономически эффективным и целесообразным. Однако по причине повышенного износа оборудования он применим далеко не ко всем энергоблокам. Принятие решения о переходе на такой режим работы энергоблока проводится только после проведения большого комплекса мероприятий по модернизации систем и оборудования станции. Соответственно, данные мероприятия требуют финансовых и трудовых затрат, что также является недостатком этого метода.

Вопросы экономической эффективности современной атомной энергетики, основанной на реакторах ВВЭР рассмотрены в работе [13]. Проведена оценка производственно-экономической эффективности станции на основе динамического анализа показателей использования установленной мощности (КИУМ). Если в 2013 году этот показатель составлял 77,9 %, то на конец 2014 года он значительно вырос до уровня 103,6 %. Автор указывает на то, что улучшение использования производственных мощностей не характеризует рост прибыльности. Это значит то, что рост издержек на ремонт оборудования для обеспечения полной готовности может привести к снижению прибыльности. Очевидно, увеличение производственных мощностей, что показателей установленной мощности, другие пути использования И повышения эффективности использования АЭС обязательно сопровождаются увеличением затрат на поддержание работоспособности установки. Также стоит упомянуть о том, что чрезмерное увеличение нагрузки сверх номинальной, эксплуатируемое десятки лет оборудование, приведет к увеличению затрат на обслуживание, увеличится частота остановов на ремонт и т.д. Значит, такой подход тоже не является выходом в вопросе поиска новых путей повышения эффективности АЭС.

В работе [14] рассмотрена проблема увеличения КПД и маневренности действующих АЭС путем модернизации тепловой схемы. С целью увеличения маневренности автор предлагает использовать систему аккумулирования тепловой энергии. А увеличение КПД предполагается за счет комбинирования

АЭС с газотурбинной установкой. Такая система обеспечит работу энергоблока на номинальном уровне мощности при этом позволит варьировать количество поступающего на турбину пара, тем самым снижать поступление электроэнергии в часы «провала» и увеличивать в часы «пик». Работа такой схемы основана на «зарядке / разрядке» специальных баков-аккумуляторов емкостью до 30000 м<sup>3</sup>. Автор сообщает о том, что к 2020 году планируется строительство не менее 20 подобных энергоблоков в России и столько же за рубежом. Строительство энергокомплекса с системой аккумулирования тепловой энергии является одним из перспективных решений на пути повышения маневренности станции. Однако имеются нерешенные вопросы безопасности и надежности такой системы, так как строительство, монтаж и эксплуатация дополнительного оборудования увеличивает риск возможных аварий и затраты на обслуживание.

# 1.2 Развитие технологии ВТГР

В отношении использования тепловой энергии преимущества имеют высокотемпературные газоохлаждаемые реакторы [15,16]. Они работают в цикле Брайтона, как правило, с рекуперацией тепла изобарических процессов. Особенностью цикла является высокая доля дополнительных работ цикла по отношению к полезной работе (около 4 против 1 в цикле Ренкина). КПД таких реакторов достигает 46 %. Недостатком является необходимость достижения высоких температур в цикле – около 1000 °C (против ~300 °C в ВВЭР). Отсюда проблемы с технологией изготовления твэлов и элементов газового контура.

В статье [15] показано авторское видение проблемы развития атомной энергетики. Сделан акцент на том, что дальнейшее развитие ядерных энергетических технологий должно быть направлено на разработку многоцелевых ядерных энергетических установок на базе высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов. Реакторы этого типа могут стать как источниками электроэнергии, так и поставщиками высокопотенциального тепла (имея температуру теплоносителя более 850 °С), причем часть энергии может быть использована на поддержание работоспособности самого энергокомплекса. Из основных преимуществ установки типа ВТГР на тепловых нейтронах автором выделены высокий КПД и маневренность. Сообщается что установка с гелиевым теплоносителем и газовой турбиной даст возможность поднять КПД за счет эффективного производства электроэнергии в прямом газотурбинном цикле до 50%, в то время как ныне действующие установки с паровыми турбинами обеспечивают КПД 32 %. Еще одной особенностью этого типа реакторов является возможность работы как в закрытом ядерном топливном цикле, так и в открытом топливном цикле с использованием урана, плутония и тория. В статье также приводится историческая справка о проекте демонстрационного высокотемпературного peaktopa AVR, который вошел в строй в 1967 г в Юлихе (Германия). Опыт эксплуатации этого реактора позволил создать более мощную установку ТНТR-300.

На фоне очевидных преимуществ ВТГР имеются некоторые особенности конструкции. Так, к примеру, высокая температура теплоносителя на уровне

850 °C и более предъявляет особые требования к топливной композиции и конструкционным материалам, тем самым усложняет и удорожает проект в целом

В статье [16] рассмотрены основные направления развития атомной энергетики. Упор сделан на преимущества реакторов типа ВТГР с гелиевым охлаждением. Показано то, что на ряду с современными реакторами нового поколения, реакторы типа ВТГР могут стать основными претендентами, удовлетворяющими требованиям развивающейся атомной энергетики на тепловых нейтронах. Из принципиальной особенности этих реакторов авторами выделены следующие: "высокая эффективность (КПД до 50 %), возможность использования высокопотенциального тепла. повышенная безопасность. возможность реализации эффективное использование ядерного топлива, различных топливных циклов, приемлемость экономических показателей в отношении стоимости электроэнергии по сравнению с альтернативными энергоисточниками".

Использование графита продиктовано его высокой температурой плавления. Однако ресурс графита под действием температурных градиентов и флюенса повреждающих нейтронов неуклонно снижается.

Китай, согласно [17], реализует программу коммерциализации ВТГР для производства электроэнергии и в качестве источника высокотемпературного тепла для промышленных нужд. В 2003 году в институте ядерных и новых энергетических технологий (INET) начал работать испытательный модуль HTR-10 (рисунок 2).



Рисунок 2 – Дизайн реактора HTR-10 [18]

В конструкции этого реактора используется 27000 сферических топливных элементов, а каждый элемент в свою очередь содержит около 8000 частиц с топливом покрытых оболочкой (рисунок 3). В качестве теплоносителя используется газообразный гелий, способный иметь высокую температуру, не претерпевая фазовых изменений. Такой реактор характеризуется внутренней присущей безопасностью и высокой, по сравнению с водяными реакторами, эффективностью. В случае остановки циркуляции теплоносителя температура топлива не превысит 1600 °C. Научные исследования в этом направлении продолжались в течение 20 лет. За это время было изготовлено топливо, исследована технология гелия, разработана методология проектирования, был разработан концептуальный проект реактора, а также проведены необходимые прикладные исследования.



Рисунок 3 – Активная зона HTR-10 с топливом [19]

Данный проект имеет следующие особенности. Активная зона реактора и парогенератор находятся в двух смежных корпусах давления и связаны трубопроводом горячего газа. Холодный гелий на выходе из циркуляционного насоса имеет температуру 230 °С, горячий после прохождения активной зоны сверху вниз – 700 °С. Тепловая энергия горячего газа передается воде второго контура в парогенераторе. Активная зона имеет диаметр 1,8 м, высоту около 2 м и объем – 5,0 м<sup>3</sup>. Тепловая мощность реактора равна 10 МВт. Активная зона сверху, снизу и сбоку окружена графитовым отражателем, который и является основным конструкционным материалом. Топливные элементы выполнены в виде сфер диаметром 60 мм и заполнены частицами типа Triso, которые включают в себя ядра из диоксида урана диаметром 0,5 мм и оболочку из пироуглерода малой плотности, внутренними слоями из пироуглерода высокой плотности и карбида кремния и внешний слой из высокоплотного пироуглерода. В каждом топливном элементе содержится 5 г топлива с обогащением 17 %. Работоспособность топлива такой сложной конфигурации была проверена испытаниями в России. Для этого был использован реакторными

исследовательский реактор ИВВ-2М (НИКИЭТ), способный реализовать режимы нормальной и аварийной работы топлива. В настоящее время реактор HTR-10 используют для исследования эксплуатационных параметров реакторов типа ВТГР.

На основе этого проекта сегодня разрабатывается дизайн реактора HTR-PM, термодинамическая эффективность которого достигает 43 % при тепловой мощности 500 MBT [20].

# 1.3 Водо-водяные реакторы с шариковыми микротвэлами

# 1.3.1 Проект FBNR

На горизонте инновационных проектов ядерных энергетических установок появляются совершенно неожиданные на первый взгляд идеи. Так в работах [21,22] рассмотрена реакторная установка, которой выполнено В комбинирование технологий водо-водяных реакторов и высокотемпературных газовых. Проект бразильского peaktopa FBNR (Fixed Bed Nuclear Reactor) [23] представляет собой вариант внедрения в технологию реактора типа PWR микротвэлов, которые присуще реакторам керамических типа HTGR. Реакторный модуль разделен на две части: в верхней части находится активная зона, которая формируется из сферических твэлов, находящихся во взвешенном состоянии в восходящем потоке охлаждающей воды. Здесь же располагается и встроенный парогенератор. В нижней части реакторного модуля расположена камера для сброса топлива. Камера представляет собой змеевик, выполненный из материала, который хорошо поглощает нейтроны. Встроенный парогенератор выполнен кожухотрубного типа. Мощность реакторной установки может быть увеличена добавлением большего количества реакторных модулей. Схема данного реактора показана на рисунке 4.

Принцип работы реактора следующий: при определенной скорости вращения циркуляционного насоса сферические твэлы диаметром 15 мм поднимаются из камеры сброса топлива в активную зону, где заполняют ее и образуют критическую масса топлива. Топливо удерживается в активной зоне под действием потока водяного теплоносителя. Поэтому в случае потери теплоносителя по какой-либо причине сферические твэлы под действием силы гравитации вернутся в камеру сброса топлива. Такой подход отвечает требованиям внутренней присущей безопасности ядерной установки.



Рисунок 4 – Дизайн реактора FBNR [24]

Сферический топливный элемент реактора FBNR (рисунок 5) выполнен в виде матрицы, содержащей микротвэлы и покрытой защитным слоем из карбида кремния по аналогии с вышеописанным проектом HTR-10. Такие микротвэлы способны длительное время удерживать продукты деления при температуре до 1600 °C.



Рисунок 5 – Сферический топливный элемент [25]

В случае использования в качестве теплоносителя пара сверхкритического давления, имеется возможность повысить термодинамическую эффективность цикла. В этом случае пар сверхкритического давления охлаждает активную зону и приводит в действие паровую турбину. При работе реактора под давлением 25 МПа вода сверхкритических параметров не подвержена фазовым переходам и кипение отсутствует. Более высокий по сравнению с обычными реакторами PWR подогрев теплоносителя более чем на 100 °C в активной зоне реактора позволяет получить термодинамическую эффективность цикла на уровне 40%.

Также возможен вариант использования гелия в качестве теплоносителя. Тогда данный реактор будет обладать всеми преимуществами газоохлаждаемого реактора, включая использование газовой турбины прямого цикла. Что существенно увеличит термодинамическую эффективность. В этом вариант реактор FBNR станет реактором на быстрых нейтронах.

Концепция такого реактора предполагает, как выработку электроэнергии, так и многоцелевое применение, включая производство высокотемпературного пара и питьевой воды.

#### 1.3.2 Проект AFPR

Параллельно с бразильским проектом FBNR в США ведутся работы по проектированию кипящего реактора типа BWR электрической мощностью 100 MBт. Этот проект получил название AFPR-100, что означает Atoms For Peace Reactor [26]. В данном реакторе также используется насыпная активная зона из микротвэлов на основе диоксида урана обогащением порядка 10 % с покрытием из Si-PyC, подобных топливу бразильского FBNR (рисунок 5). Микротвэлы омываются поперечным потоком воды первого контура, которая, испаряясь, покидает активную зону через гофрированные стенки топливной сборки, которые препятствуют выносу микротвэлов за пределы активной зоны. Свежее и отработавшее топливо хранится внутри корпуса реактора в течение 40 лет эксплуатации. Для загрузки нового топлива в верхней части реакторного корпуса предусмотрен специальный бак свежего топлива. Отработавшее топливо под действием сил гравитации после открытия специальных клапанов направляется по каналам в нижнюю часть корпуса, где расположены борированные стальные трубки. На освободившееся место поступает свежее топливо из верхнего бака. Такой подход к процессу перегрузки реактора обеспечивает постоянное нахождение топлива внутри реакторной установки, что исключает возможность доступа к нему со стороны персонала или третьих лиц. Регулирование реактора обеспечивается классическими вертикальными стержнями, которые перемещаются в специальных каналах по всей высоте активной зоны.

Реактор AFPR-100 может работать как в режиме кипящего реактора, так и в режиме обычного реактора типа PWR. Мощность реактора выбрана из условия количества топлива единовременно находящего в корпусе, которого потребуется не более 100 т, следовательно, его можно беспрепятственно транспортировать на площадку любым доступным видом транспорта.

Рассмотренные проекты реакторных установок показывают современную тенденцию к исследованию новых технологий, основанных на комбинировании лучших качеств известных и хорошо отработанных реакторных установок с учетом новых повышенных требований безопасности.

# 1.4 Постановка задачи

Анализ представленных литературных данных показал, что на данный момент научным сообществом предложено два пути повышения эффективности использования АЭС с реакторами на тепловых нейтронах. В одном случае предлагаются варианты по модернизации действующих и проектируемых АЭС с реакторами ВВЭР-1000, в другом рассматривается развитие атомной энергетики на основе высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов, а также реакторов комбинированного типа. Сравнительный анализ литературных источников показал, что у этих подходов есть как сильные, так и слабые стороны.

В случае продолжения развития атомной энергетики, основанной на реакторах типа BBЭP-1000 существует риск того, что такая атомная энергетика будет неконкурентоспособной в ближайшие десятилетия. Так как предлагаемые направления модернизации являются затратными, а достигаемая эффективность не значительна. Это, с ростом процентных ставок экономики, приведет к потере прибыли таких АЭС.

На наш взгляд, наиболее перспективным выглядит второе направление развития. Как известно, высокотемпературные газоохлаждаемые реакторы значительно выигрывают у водо-водяных как по теплофизическим показателям, по параметрам самозащищенности и безопасности, так и по экономической эффективности. Однако на фоне всех их преимуществ, эти реакторы имеют ряд недостатков, которые затормозили их развитие на заре атомной энергетики и продолжают сдерживать сегодня. К ним относятся: работа турбины по циклу Брайтона, высокая температура теплоносителя, и пр.

Современные же проекты ядерных установок, основанных на комбинировании отработанных технологий нацелены в первую очередь на достижение абсолютной безопасности и рентабельности проекта. При этом многие технические параметры и характеристики оборудования занижаются в силу современных требований.

Из вышесказанного следует, что современная атомная энергетика имеет ряд технических проблем, которые требуют решения. К ним относятся:

- неэффективное использование ядерного топлива;

– низкая эффективность схем передачи тепла в контур паровой турбины (низкий КПД);

– высокая стоимость производства и эксплуатации массивного теплообменного оборудования.

В отличие от реактора ВВЭР газоохлаждаемый реактор с водным замедлителем лишен корпуса высокого давления. Газовый теплоноситель (гелий) имеет рабочее давление 6 – 7 МПа, при этом его максимальная температура ограничена свойствами материалов первого контура. В

предлагаемой схеме АЭС рабочая температура теплоносителя на выходе из реактора не превышает 500 °С. Замедлителем является смесь тяжелой и легкой воды в пропорциях, обеспечивающих лучшие нейтронно-физические характеристики и экономичность. В сравнении с реактором CANDU, где имеет место потеря энергии, ушедшей в замедлитель, в ГОР она направляется в теплообменник для подогрева питательной воды парогенератора.

В тепловой схеме АЭС имеется пять теплообменных аппаратов – подогреватель, парогенератор и три пароперегревателя, в отличие от четырех парогенераторов реактора ВВЭР, габариты и вес которых, в пересчете на единицу мощности, практически вдвое больше. Работа паровой машины по циклу Ренкина позволяет использовать известные и хорошо отработанные турбины ТЭС, при этом высокая степень сухости пара на выходе каждой ступени позволяет снизить затраты на легирование лопаток турбины.

Модернизация конструкции теплообменного оборудования АЭС решает проблему больших габаритов и массы, что благоприятно влияет на его производство, эксплуатацию и обеспечивает снижение стоимости капитального строительства энергоблока. Оптимизация конструкции и схемы работы теплового оборудования по циклу Ренкина позволила достичь максимальной эффективности до 46 %. Данное значение КПД находится на уровне достигнутого в современной тепловой энергетике. В частности, в проекте энергоблока мощностью 600 МВт с применением угля в качестве топлива, с параметрами свежего пара: 28,5 МПа, 600 °C и КПД нетто равным 46 % [27].

На основании вышеизложенного можно сформулировать следующие задачи данного исследования:

1. Разработать нейтронно-физическую расчетную модель активной зоны газоохлаждаемого реактора с водным замедлителем;

2. Провести ряд нейтронно-физических расчетов различных конфигураций активной зоны реактора и расчетов кампании АЭС на основе этого реактора;

3. Разработать расчетную сеточную модель теплообменного оборудования и выполнить тепловые и конструкционные расчеты парогенератора и прочего оборудования первого контура;

4. Показать эффективность схемы АЭС на основе газоохлаждаемого реактора с водным замедлителем с включением теплового оборудования в цикл Ренкина;

5. Разработать экспериментальную установку по исследованию процессов парообразования и перегрева пара и продемонстрировать возможность реализации единого контура включающего подогрев теплоносителя, парообразование и перегрев пара;

6. На экспериментальной установке получить пар с высокой степенью сухости при температуре 500 °С и показать устойчивость тонкостенной теплообменной трубки к тепловому и вибрационному воздействию.

# 2 МЕТОДЫ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

В данном разделе рассмотрены методики, которые были применены для решения поставленных задач. К ним относятся: метод аналитического расчета теплообменного оборудования АЭС, анализ сложных систем методом конечных элементов, метод Монте-Карло, применяемый для расчета переноса частиц, в частности нейтронов в активной зоне.

# 2.1 Классический подход к расчету теплообменных аппаратов

2.1.1 Общие сведения

Теплообменные аппараты имеют разнообразную конструкцию, однако существует общая методика тепловых расчетов, которую можно широко применять для оценки эффективности работы аппарата. В зависимости от имеющихся исходных данных теплотехнические расчеты делят на два вида: конструкторский или проектный и поверочный [28,29].

Конструкторский расчет выполняется при проектировании теплообменника, если заданы расходы теплоносителей и их параметры. Целью конструктивного расчета является определение площади теплообмена и конструктивных размеров выбранного устройства.

Проверочный расчет проводится для выявления возможности использования существующих или стандартных теплообменников для тех технологических процессов, в которых используется данное устройство. В поверочном расчете указаны габариты устройства и условия эксплуатации, а неизвестное значение – это реальная производительность теплообменника. Проверочный расчет выполняется для оценки работы устройства в режимах, отличных от номинальных. Цель поверочного расчета – выбор условий, которые обеспечат оптимальную работу устройства.

Конструкторский расчет состоит из тепловых (теплотехнических), гидравлических и механических расчетов.

Порядок конструкторских расчетов. Для проведения расчета необходимо указать: тип теплообменника (змеевик, кожухотрубный, труба в трубе, спиральный), наименование греющих и охлаждаемых теплоносителей (жидкость, пар или газ), производительность теплообменника (массовый расход одного из теплоносителей), начальная и конечная температуры теплоносителей.

Необходимо определить: физические параметры и скорость движения теплоносителей, расход теплоносителя или охлаждающей среды на основе теплового баланса, средний перепад температур, коэффициенты теплопередачи и теплоотдачи, поверхность теплопередачи, конструктивные размеры устройства (длина, диаметр и количество витков змеевика, длина, количество трубок и диаметр корпуса в трубном пучке устройства, количество витков и диаметр корпуса в спиральном теплообменнике и др.), диаметр штуцеров для входа и выхода теплоносителей. Теплообмен между теплоносителями существенно меняется в зависимости от физических свойств и параметров теплоносителя, а также от гидродинамических условий движения теплоносителей.

В задании на проектирование указываются рабочие среды (вид теплоносителя), их начальная и конечная температуры. Необходимо определить среднюю температуру каждой среды и при этой температуре найти значения ее физических параметров по справочным таблицам.

Среднюю температуру теплоносителя можно приближенно определить, как среднее арифметическое из начальной  $t_{\rm H}$  и конечной  $t_{\rm K}$  температур.

Расчетными физическими параметрами теплоносителей являются: вязкость, плотность, массовая удельная теплоемкость, коэффициент теплопроводности, температура кипения, скрытая теплота испарения и прочие.

Эти параметры собраны в виде таблиц и диаграмм в справочной литературе [28,30,31].

Согласно [28]: "При проектировании теплообменных устройств необходимо создавать такие расходы теплоносителей (их рабочей среды), при которых коэффициенты теплоотдачи и гидравлические сопротивления были бы экономически выгодными. Выбор подходящей скорости имеет большое значение для хорошей работы теплообменника, так как с увеличением скорости теплообмена и значительно увеличиваются коэффициенты уменьшается площадь теплообмена, это значит, что устройство имеет меньшие конструктивные размеры. Одновременно с увеличением скорости увеличивается гидравлическое сопротивление устройства, а значит и энергетические затраты на привод насоса и опасность гидроудара и вибрации труб. Минимальное значение скорости определяется достижением турбулентного движения потока (для легкоподвижных жидкостей с малой вязкостью критерий Рейнольдса больше 10000)."

Значит средняя скорость движения среды может быть вычислена по уравнениям объемного и массового расходов [30]:

$$\omega_{\rm cp} = \frac{V}{S}, \, {\rm M/c}; \, W_{\rm cp} = \frac{G}{S}, \, {\rm Kr}/({\rm M}^2 \cdot {\rm c})$$
(2.1)

где  $\omega_{cp}$ - средняя скорость, м/с;

V- объемный расход, м<sup>3</sup>/с;

S- площадь сечения, м<sup>2</sup>;

 $W_{cp}$ - средняя массовая скорость, кг/(м<sup>2</sup>/c);

*G*-массовый расход, кг/с.

Имеется математическая взаимосвязь между массовой скоростью и линейной:

$$W_{\rm cp} = \omega_{\rm cp} \cdot \rho, \, \kappa \Gamma / (M^2 \cdot c)$$
(2.2)

где  $\rho$  – плотность среды, кг/м<sup>3</sup>.

22

По справочным данным [29]: "Для большинства применяемых диаметров труб рекомендуется принимать скорость теплоносителей порядка 1,5-2 м/с (не более 3 м/с), нижний предел скорости для большинства жидкостей составляет от 0,06 до 0,3 м/с. Скорость, соответствующая Re=10000, для жидкостей с малой вязкостью в большинстве случаев не превышает 0,2-0,3 м/с. Для вязких жидкостей турбулентность потока достигается при больших скоростях, поэтому при расчетах полагают слаботурбулентный или даже ламинарный режим.

Для газов при атмосферном давлении имеют место массовые скорости на уровне 15 – 20 кг/(м<sup>2</sup> · c), низший предел при этом составляет 2,0 – 2,5 кг/(м<sup>2</sup> · c), а линейные скорости достигают 25 м/с; для насыщенных паров при конденсации рекомендуется принимать скорость до 10 м/с.

Скорости движения рабочих сред в патрубках штуцеров: для насыщенного пара составляют от 20 до 30 м/с; для перегретого пара – до 50 м/с; для жидкостей – 1,5 – 3 м/с; для конденсированного греющего пара – от 1 до 2 м/с."

2.1.2 Тепловой расчет

Тепловой расчет заключается в первую очередь в вычислении тепловой нагрузки теплообменника и расхода (массового) греющего или охлаждающего теплоносителя. Тепловой нагрузкой принято считать количество тепла, которое передается от «горячего» теплоносителя к «холодному». Очевидной становится математическая формулировка уравнения теплового баланса:

$$Q = Q_{\rm rop} = Q_{\rm xon} \tag{2.3}$$

Уравнения теплового баланса, в зависимости от конкретного теплотехнического процесса, могут принимать различный вид. В общем виде уравнение теплового баланса можно представить в виде равенства:

$$Q_{\rm прих} = Q_{\rm pacx} \tag{2.4}$$

Далее более подробно рассмотрим уравнения теплового баланса для некоторых наиболее распространенных типов теплообменников.

#### Уравнение теплового баланса «холодильника»

Согласно приведенным ранее уравнениям (2.3) и (2.4) количество теплоты отнятого от «горячего» теплоносителя принимается равным теплу, приходящему к «холодному» теплоносителю, а количество теплоты принятого «холодным» теплоносителем равным расходуемому теплу. Тогда имеем:

$$Q_{\rm rop} = G_{\rm rop} \cdot \mathbf{c} \cdot (t_1' - t_2') \tag{2.5}$$

$$Q_{\text{XOA}} = G_{\text{XOA}} \cdot \mathbf{c} \cdot (t_2^{\prime\prime} - t_1^{\prime\prime})$$
(2.6)

23

где  $G_{rop}$  – расход «горячего» теплоносителя, кг/с;

с – средняя удельная теплоемкость «горячего» теплоносителя, Дж/(кг·град);

 $t'_1$  и  $t'_2$ - начальная и конечная температуры «горячего» теплоносителя;  $G_{xon}$  – расход охлаждающей воды, кг/с;

с<sub>в</sub>- средняя удельная теплоемкость охлаждающей воды, Дж/(кг·град);

 $t_2''$ и  $t_1''$  – температура охлаждающей воды на выходе и на входе в аппарат.

Из уравнений теплового баланса получим:

$$G_{\rm rop} \cdot c \cdot (t_1' - t_2') = G_{\rm xon} \cdot c \cdot (t_2'' - t_1'')$$
(2.7)

Определим массовый расход охлаждающей воды (кг/с):

$$G_{\rm XOJ} = G_{\rm rop} \cdot \frac{\mathbf{c} \cdot (t_1' - t_2')}{\mathbf{c} \cdot (t_2'' - t_1'')}$$
(2.8)

#### Уравнение теплового баланса «подогревателя»

В этом виде теплообменника нагрев одного из теплоносителей происходит за счет конденсации греющего водяного насыщенного пара:

$$Q_{\text{прих}} = \mathcal{A} \cdot (i_1 - i_2); Q_{\text{pacx}} = G_{\text{c}} \cdot (t_2 - t_1)$$
(2.9)

где Д – массовый расход греющего пара, кг/с;

 $i_1$  – энтальпия греющего пара, Дж/кг;

 $i_2$  – энтальпия конденсата, Дж/кг;

 $G_{\rm c}$  – расход нагреваемого вещества, кг/с;

с – теплоемкость нагреваемого вещества, Дж/(кг.град);

*t*<sub>1</sub>и *t*<sub>2</sub> – начальная и конечная температура вещества, град.

Уравнение теплового баланса для «подогревателя» принимает вид:

$$Q_{\rm прих} = Q_{\rm pacx} + Q_{\rm пот} \tag{2.10}$$

где  $Q_{\text{пот}}$  – потери тепла от стенок в окружающую среду, Вт.

Практически доказано то, что потери тепла в окружающую среду составляют порядка 2 - 3 % от подведенного тепла и учитываются специальным коэффициентом  $\eta = 0.97 - 0.98$ :

$$\mathcal{A} \cdot (i_1 - i_2) \cdot \eta = G_c \cdot (t_2 - t_1) \tag{2.11}$$

Преобразуем уравнение (2.11) так, чтобы выразить массовый расход греющего пара (кг/с):

$$\mathcal{A} = \frac{G \cdot c \cdot (t_2 - t_1)}{(i_1 - i_2) \cdot \eta}$$
(2.12)

#### Уравнение теплового баланса «испарителя»

В «испарителе» нагрев «холодного» теплоносителя сопровождается изменением его агрегатного состояния, жидкость переходит в пар, в это же время «горячий» теплоноситель (например, насыщенный пар), отдавая тепло также изменяет агрегатное состояние, другими словами конденсируется:

$$Q_{\text{прих}} = \mathcal{A} \cdot (i_1 - i_2); \ Q_{\text{pacx}} = Q_1 + Q_2 + Q_{\text{пот}}$$
(2.13)

где  $Q_1$  – тепло, расходованное для нагрева «холодного» теплоносителя до температуры кипения, Вт;

 $Q_2$  – тепло, необходимое для испарения кипящей жидкости, Вт.

$$Q_1 = G \cdot c \cdot (t_s - t_1); \ Q_2 = G \cdot r \tag{2.14}$$

где G- расход «холодного» теплоносителя, кг/с; c – удельная теплоемкость теплоносителя, Дж/(кг·град);

 $t_s$  – температура кипения «холодного» теплоносителя, град;

 $t_1$  – начальная температура «холодного» теплоносителя, град;

*r*-скрытая теплота парообразования теплоносителя, Дж/кг.

Уравнение теплового баланса примет вид:

$$\mathcal{A} \cdot (i_1 - i_2) \cdot \eta = G \cdot c \cdot (t_s - t_1) + G \cdot r \tag{2.15}$$

Массовый расход греющего пара (кг/с) выразим из уравнения (2.15):

$$\mathcal{A} = \frac{G \cdot c \cdot (t_s - t_1) + G \cdot r}{(i_1 - i_2) \cdot \eta}$$
(2.16)

# Уравнение теплового баланса «конденсатора»

В этих аппаратах происходит охлаждение «горячего» теплоносителя с изменением его агрегатного состояния. К примеру, технологическое вещество (пары этилового спирта), охлаждаясь, конденсируются, и жидкий этиловый спирт выходит с заданной температурой  $t_2$ . Тепло от «горячего» теплоносителя чаще всего отводится холодной водой:

$$Q_{\text{pacx}} = Q_1 + Q_2 + Q_3; \ Q_{\text{pacx}} = W \cdot c_{\text{B}} \cdot (t'' - t')$$
 (2.17)

где  $Q_1$ - тепло, образующееся при охлаждении перегретых паров от  $t_{n.n}$  до насыщенного состояния  $t_{h.n} = t_s$ , Вт;

 $Q_2$  – тепло, выделяющееся при конденсации насыщенного пара, Вт;

 $Q_3$  — тепло, выделяющееся при охлаждении горячей жидкости от  $t_s$ до заданной температуры  $t_2$ , Вт;

*W*– расход охлаждающей воды, кг/с;

*с*<sub>в</sub>- удельная теплоемкость воды, Дж/(кг·град).

$$Q_1 = G \cdot c_p \cdot (t_{\Pi,\Pi} - t_s); \ Q_2 = G \cdot r; \ Q_3 = G \cdot c \cdot (t_s - t_2)$$
(2.18)

где G – расход горячего теплоносителя, кг/с;

*c*<sub>p</sub> – удельная теплоемкость перегретого пара, Дж/(кг град);

*r*-скрытая теплота конденсации «горячего» теплоносителя, Дж/кг;

с- удельная теплоемкость «горячего» теплоносителя Дж/(кг·град).

Уравнение теплового баланса примет вид:

$$G \cdot c_p \cdot (t_{\Pi,\Pi} - t_{H,\Pi}) + G \cdot r + G \cdot c \cdot (t_s - t_2) = W \cdot c_B \cdot (t'' - t')$$
(2.19)

В случае, когда охлаждающий теплоноситель попадает в межтрубное пространство, а стенки теплообменного аппарата имеют температуру близкую к температуре окружающей среды, то тепловые потери ничтожно малы и их не учитывают.

Из уравнения (2.19) определяется массовый расход охлаждающей воды (кг/с):

$$W = \frac{G \cdot c_{p} \cdot (t_{\Pi,\Pi} - t_{H,\Pi}) + G \cdot r + G \cdot c \cdot (t_{s} - t_{2})}{c_{B} \cdot (t'' - t')}$$
(2.20)

При дополнительных условиях, осложняющих процесс, например, приход или расход тепла за счет химической реакции или превращения вещества, их также необходимо учитывать при составлении уравнения теплового баланса.

#### 2.1.3 Расчет температурного режима

Расчет температурного диапазона теплообменника состоит из определения среднего перепада температур, расчета средних температур теплоносителей (рабочих сред), а также определения температуры стенок устройства.

При расчете температурного режима теплообменника в первую очередь необходимо определить характер изменения температуры теплоносителей и выбрать схему их движения с целью получения большого среднего перепада температур. Это обеспечивает наиболее благоприятные условия для теплопередачи и самую низкую температуру стенок устройства.

Направления движения охлаждающих жидкостей могут быть прямоточными, противоточными, поперечными и смешанными. Наилучшие результаты достигаются за счет противоточного движения, поэтому по возможности во всех теплообменниках создается противоток движению теплоносителей.

Рассмотрим подробнее методы решения задач с этими видами движения теплоносителя.

теплообменнике В прямом происходит параллельное движение теплоносителей в одном направлении. Сначала находим разницу температур на концах теплообменника:

$$\Delta t_{\rm H} = t_1' - t_2'; \Delta t_{\rm K} = t_1'' - t_2'' \tag{2.21}$$

где  $t'_1$  и  $t'_2$  – начальная и конечная температуры первой среды, град;  $t''_1$  и  $t''_1$  – начальная и конечная температуры второй среды, град.

Затем определяется отношение большей разности температур к меньшей. При условии, когда температура рабочих сред вдоль поверхности теплообмена изменяется незначительно, среднюю разность температур определяют по формуле:

$$\Delta t_{\rm cp} = \frac{\Delta t_{\rm H} - \Delta t_{\rm K}}{2} \tag{2.22}$$

Если отношение большей разности температур к меньшей превышает два градуса, то уравнение (2.22) преобразуется к логарифмическому виду:

$$\Delta t_{\rm cp} = \frac{\Delta t_{\rm H} - \Delta t_{\rm K}}{\ln \frac{\Delta t_{\rm H}}{\Delta t_{\rm K}}} \tag{2.23}$$

В случае противоточного теплообменника теплоносители движутся параллельно в противоположных направлениях. Среднюю разность температур противотока можно определить в том же порядке, что и для прямоточного, тогда используются формулы (2.22) и (2.23).

Для сложных схем течения теплоносителей, то есть с перекрестными и смешанными потоками, необходимо определить среднюю разность температур, как и при противотоке, а затем ввести поправочный коэффициент.

устройства определяется аналитическими Температура стенки И графическими методами и зависит от средних температур рабочих сред и условий теплопередачи. Для его определения используем уравнение:

$$q = K \cdot \Delta t_{cp} = \alpha_1 \cdot (T - t_{cT1}) = \alpha_2 \cdot (t_{cT2} - t)$$
(2.24)

где  $q = \frac{Q}{F}$  – плотность теплового потока, BT/м<sup>2</sup>; K – коэффициент теплопередачи, Вт/(м-град);  $\Delta t_{cp}$  – средняя разность температур (температурный напор), град.;  $\alpha_1$  – коэффициент теплоотдачи от «горячей» среды к стенке, 1/(м·град); T – средняя температура «горячей среды», град;

 $t_{\rm ct1}$  и  $t_{\rm ct2}$  температура стенки, соприкасающейся с горячей и холодной водой, град;

 $\alpha_2$  – коэффициент теплоотдачи к «холодной» среде, Вт/(м<sup>2</sup>-град);

t – средняя температура «холодной среды», град.

Тогда температура стенок будет определяться по выражениям:

$$t_{\rm ct1} = T - \frac{K}{\alpha_1} \cdot \Delta t_{cp} \tag{2.25}$$

$$t_{\rm ct2} = t + \frac{K}{\alpha_2} \cdot \Delta t_{cp} \tag{2.26}$$

Отношением  $\frac{\kappa}{\alpha}$  нужно предварительно выбрать, а затем проверить его соответствие расчетной величине методом последовательных приближений.

2.1.4 Расчет коэффициента теплопередачи

Коэффициент теплопередачи – это количественная величина, зависящая от коэффициентов теплоотдачи, термического сопротивления и степени загрязнений (теплопроводность слоя загрязнения) [29].

Так для плоской стенки имеем:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}$$
(2.27)

где  $\alpha_1$  – коэффициент теплоотдачи от «горячего» теплоносителя, Вт/(м·град);

 $\delta_1$  – толщина стенки теплообменника, м;

 $\lambda_1$  – коэффициент теплопроводности материала, Вт/(м·град);

 $\alpha_2$  – коэффициент теплоотдачи от стенки к «холодному» теплоносителю, Вт/(м град);

*R* – термическое сопротивление стенки вследствие загрязнений, м<sup>2</sup>·град/Вт.

Примерные значения коэффициента *R* приведены в [32]. Если в трубах отношение наружного диаметра к внутреннему меньше либо равно двум, то для вычисления *K* можно пользоваться формулой (2.27).

При условии, когда теплопроводность слоя загрязнения неизвестна, *К* вычисляют для «чистой» стенки, а влияние загрязнения учитывают при помощи другого коэффициента – коэффициента использования поверхности теплообмена *j*. Для большинства аппаратов *j* лежит в переделах от 0,65 до 0,85.

Если предполагается выпадение осад теплоносителе, то j выбирают в диапазоне от 0,4 до 0,5.

Коэффициент теплоотдачи α определяется по формуле [29]:

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{l} = \frac{Nu \cdot \lambda}{d_{\mathfrak{H}}}$$
(2.28)

где *Nu* –критерий подобия Нуссельта;

λ – коэффициент теплопроводности теплоносителя, Вт/(м·град);

*l* – геометрический параметр, м;

 $d_{\mathfrak{p}}$ – эквивалентный диаметр, м.

Эквивалентный диаметр можно найти по соотношению:

$$d_{\mathfrak{g}} = \frac{4 \cdot F}{\Pi} \tag{2.29}$$

где *F*-площадь поперечного сечения потока, м<sup>2</sup>;

П – смоченный периметр, м.

Критерий Нуссельта в зависимости от состояния и характера движения сред определяется по различным критериальным уравнениям.

Для подсчета  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  критериальное уравнение выбирается по справочной литературе так, чтобы оно наиболее точно совпадало с условиями расчета.

Для турбулентного режима течения жидкостей внутри труб [28, 29] (*Re* > 10000) рекомендуется критериальное уравнение, представленное ниже:

$$Nu = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \tag{2.30}$$

где *Re* – критерий Рейнольдса;

*Pr* – критерий Прандтля.

2.1.5 Гидравлический расчет

Основная цель гидравлического расчета – определение величины гидравлического сопротивления системы и определение, так называемой «мощности на прокачку» – энергии, необходимой для продвижения теплоносителя по тракту.

Чтобы преодолеть гидравлическое сопротивление аппарата и обеспечить проход теплоносителя через теплообменный аппарат, на напорной линии должно создаваться некоторое избыточное давление.

Потеря давления (напора) при движении теплоносителя в трубах и межтрубном пространстве измеряется в единицах давления (паскаль) [32] и определяется по формуле:

$$\Delta P = \frac{\lambda \cdot (\frac{l \cdot n}{d_{\Im}} + \Sigma \xi) \cdot W^2}{2 \cdot \rho}$$
(2.31)

где *λ* – коэффициент трения;

*l* – длина одного пролета (участка), м;

*n* – число пролетов (участков);

 $d_{\mathfrak{p}}$  – эквивалентный диаметр трубы, м;

 $\Sigma \xi$  – сумма коэффициентов сопротивлений;

W – массовая скорость среды, кг/(с м<sup>2</sup>);

 $\rho$  – плотность среды, кг/м<sup>3</sup>.

Коэффициент трения: для ламинарного течения среды (Re > 2300) в трубах круглого сечения определяется соотношением  $\lambda = 64/\text{Re}$ .

Потеря давления в прямой трубе (Па) находится из уравнения:

$$\Delta P = \lambda \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{W^2}{2 \cdot \rho} \tag{2.32}$$

где  $L = \pi \cdot D \cdot n$  – длина трубы, м.

Мощность на «прокачку» для преодоления гидравлических сопротивлений рассчитывается по формуле (кВт):

$$N = \frac{V \cdot \Delta P}{1000 \cdot \eta} \tag{2.33}$$

где V – объемный расход теплоносителя, м<sup>3</sup>/ч;

 $\Delta P$  – величина потери напора, Па;

η – коэффициент полезного действия насоса создающего напор.

Далее по рассчитанной мощности подбирается насос для подачи теплоносителя.

На последнем этапе расчета проводится механический расчет теплообменного аппарата, который состоит из проверки на прочность отдельных узлов и деталей, и сводится к определению их расчетных размеров (толщины стенок, фланцев и т.п.), которые должны обеспечить им необходимую долговечность.

Приведенная выше методика расчета теплообменного аппарата позволяет рассчитать все основные параметры теплообменного аппарата, которые далее проверяются и уточняются на этапе компьютерного моделирования.

В рамках данного диссертационного исследования данная методика принята основным «классическим» методом проведения расчетных исследований теплообменных аппаратов. Далее будут показаны авторские способы совершенствования и оптимизации этой методики с целью увеличения скорости и качества проведения расчетов.

# 2.2 Нейтронно-физический расчет характеристик активной зоны и кампании реактора

2.2.1 Метод Монте-Карло для анализа нейтронно-физических характеристик активной зоны

Монте-Карло - метод численного анализа, использующий случайную выборку для построения решения физической или математической задачи. Датой появления метода принято считать 1949 год, с появления статьи под названием «The Monte Carlo method» [33]. Создателями этого метода являются два американских математика Дж. Нейман и С. Улам. При этом теоретическая основа метода была известна уже давно. Тогда многие задачи статистики рассчитывались с помощью случайных выборок, то есть фактически методом Монте-Карло. Широкое применение этот метод получил только после появления электронных вычислительных машин (ЭВМ).

Метод имеет две отличительных особенности: простую структуру вычислительного алгоритма и ошибку вычислений. Из-за второй особенности считается что этот метод хорошо применим только для тех вычислений, в которых не требуется большая точность получаемых результатов. Однако это не так. Чтобы добиться приемлемых результатов просто необходимо произвести большое количество вычислений одного и того же параметра, другими словами, для того чтобы уменьшить ошибку вычислений в 10 раз, нужно увеличить число испытаний (итераций, повторений) в 100 раз. Имея в распоряжении современную вычислительную технику применение этого метода позволяет получать очень точные результаты решения вероятностных задач.

Так, метод Монте-Карло позволяет моделировать любой процесс, протекание которого сопровождается рядом случайных факторов. Если математическая задача не связана с случайностями, то всегда можно искусственно придумать вероятностную модель, с помощью которой удастся решить эту задачу. Следовательно, данный метод можно отнести к универсальным методам решения любых математических задач.

Для данного диссертационного исследования применение этого метода является первостепенным. Распределение нейтронов, их перемещение, превращение и взаимодействие с материалами активной зоны носят вероятностный характер. А, следовательно, и решение нейтронно-физических задач, направленных на определения основных параметров активной зоны рассматриваемого реактора, может быть успешно выполнено методом Монте-Карло. Программным продуктом, который построен на решении подобных задач является код MCNP [34]. 2.2.2 Применение метода Монте-Карло в программе МСМР

Инструмент, наиболее часто используемый сегодня для расчета физических свойств нейтронов в ядерных установках, - это программа MCNP, которая моделирует перенос нейтронов, гамма-квантов и электронов в веществе и вычисляет различные функциональные свойства распределения этих частиц по энергии, направлению с использованием функции пространственных координат. Ярким примером распространения программы MCNP является международный справочник по оцененным экспериментам на критичность, который MCNP использует для моделирования, в отличие от других программ, которые используют этот метод только эпизодически. Следует перечислить факторы, лежащие в основе популярности MCNP.

Использование метода Монте-Карло успешно применяется ДЛЯ моделирования переноса нейтронов в среде [35-37] и часто является единственным способом решения проблем большой сложности, таких как моделирование переноса в сложной геометрии, в вакууме или вблизи области с высокой поглощающей способностью, в которой другие методы не подходят. В методе Монте-Карло определенное уравнение не решается (как в случае детерминированных методов), но моделируются возможные процессы и вычисляются события определенного типа в определенном объеме, на основе которых значения различных желаемых количеств определены. Недостатком метода является то, что вы можете определить желаемые суммы только в определенном диапазоне, в отличие от детерминистских методов, которые дают подробные распределения. Также следует отметить, что метод Монте-Карло требует большого количества вычислений (точность расчета зависит от событий количества подсчитанных И, следовательно, OT количества смоделированных историй). Однако постоянное развитие компьютерных технологий нивелирует этот последний недостаток. Кроме того, для метода Монте-Карло довольно легко провести параллельный расчет.

Подробное описание программы охватывает все аспекты использования программы, от описания используемых физических моделей до функций, изменении задействованных В создании и программы В различных операционных системах. Развитие программы идет в обоих направлениях детализация физических моделей, а также оптимизация улучшение и программного кода. Последняя версия, доступная за пределами США, -MCNP4C3. Основные отличия от предыдущей версии - это возможность моделирования спектра запаздывающих нейтронов, использование специальных данных для описания взаимодействия нейтронов с энергией в области неразрешенных резонансов. Кроме того, эта версия написана с использованием стандарта FORTRAN 90, реализована возможность параллельного выполнения вычислений.

Программа MCNP используется в качестве основы для новых программ, например, таких как MCNPX (симбиоза MCNP и LAHET), которая позволяет моделировать перенос высокоэнергетических частиц, энергия которых намного превышает так называемый «реакторный диапазон». Другой пример - программа

MSV, в которой реализована возможность моделировать процессы изменения изотопного состава облучаемого материала. При этом сохраняются основные преимущества, идеология программы MCNP и структура ввода данных, используемая для описания проблемы. Фактически, это означает расширение возможностей пользователя MCNP.

Метод Монте-Карло для моделирования переноса нейтронов используется в ряде программ, таких как KENO, MONK, COG, TART. Однако эти программы используются не так часто, как MCNP и MCNPX [38 – 40].

Принимая во внимание указанные выше свойства программы, MCNP можно использовать для выполнения детальных расчетов различных физических свойств стационарного состояния исследуемых реакторов. Такие расчеты можно использовать как напрямую, чтобы продемонстрировать жизнеспособность конкретной атомной электростанции, так и для проверки других инструментов расчета, которые менее универсальны, но требуют меньших вычислительных ресурсов. Например, распределение выделяемой энергии и температуры по высоте можно рассчитать путем последовательного выполнения расчета нейтронной физики для определения формы выделения энергии И теплогидравлического расчета для определения температурного поля, результаты которого будут представлены в следующем нейтронно-физическом расчете. Однако такая схема включает выполнение большого количества нейтронно-физических расчетов, что часто невозможно с МСМР из-за значительного объема вычислений и необходимого времени. С другой стороны, один или несколько подробных тестовых расчетов могут быть выполнены с MCNP, результаты которых могут быть использованы ПОМОЩЬЮ при тестировании многогрупповых методов.

2.2.3 Программа MC-Delta для расчета кампании реактора

В связи с ростом количества проводимых расчетов была разработана и внедрена специализированная программа, позволяющая проводить совместно с кодом MCNP5 расчет кампании моделей реакторов.

Программа MC-Delta [41] предназначена для расчета:

- изменяющегося во времени коэффициента размножения;

– изменения изотопного состава топлива, выгорающего поглотителя, конструкционных материалов;

– трансмутации актиноидов;

– скорости нейтронных реакций;

– выгорания топлива;

– длительности работы реактора.

Состав топлива изменяется в ходе кампании реактора. Содержание делящихся нуклидов в топливе и продуктов деления существенно влияют на коэффициент размножения в реакторе. Знание геометрии активной зоны и исходного состава топлива позволяет рассчитать все нейтронно-физические характеристики и состав топлива в различные моменты кампании реактора.

Программа MC-Delta обеспечивает возможность расчета состава топлива и других материалов активной зоны (например, выгорающий поглотитель, конструкционные материалы) во время кампании, которые изменяются под воздействием облучения в реакторе. Основная функция программы MC-Delta – расчет изменения композиции всей активной зоны в ходе кампании с учетом выгорание следующих процессов: выгорание топлива, поглотителя, трансмутация актиноидов, накопление актиноидов, накопление новых делящихся материалов, выгорание накопление других И нетопливных материалов, облучаемых в активной зоне.

В ходе кампании топливо неравномерно выгорает по объему активной зоны из-за неравномерности распределения потока нейтронов. Пространственное распределение нейтронного поля в активной зоне учитывается в многоточечной модели реактора. Учет этой неравномерности уменьшает погрешность расчетов характеристик реактора.

В MC-Delta используется аналитический метод решения системы дифференциальных уравнений, описывающих изменение количества нуклидов, что позволяет значительно ускорить процесс расчета.

В мире распространенными программами для расчета выгорания топлива являются такие программы как SCALE, MCNPx. Достоинством разрабатываемой программы MC-Delta является наличие открытого кода и права на модификацию кода специалистами предприятия для решения конкретных задач.

Программа написана с использованием технологии объектноориентированного программирования. Для этого в программе имеются модули, содержащие процедуры и функции общего назначения, и классы, на основе которых создаются соответствующие объекты [42]. Всего программа имеет 4 модуля и 7 классов.

Модуль «Begin» – обязательный модуль, который содержит процедуру начала работы программы. В нем содержатся необходимые константы и общие данные о реакторе (коэффициент размножения, масса топлива, мощность и другие), получаемые из результатов расчета в MCNP, функции, возвращающие пути к соответствующим файлам, которые необходимы для работы и другие функции и процедуры, которые могут понадобиться для работы остальных модулей программы.

Модуль «Reader» – содержит набор констант, массивов, процедур и функций, необходимых для считывания и анализа файла результатов MCNP, а также для структурной записи данных на компьютер для последующей работы программы.

Модуль «Overload of fuel» – позволяет зациклить выполнение программы на несколько кампаний. Содержит набор процедур и функций, необходимых для формирования данных о загрузке реактора в следующей кампании.

Модуль «МатАн» – содержит набор функций, необходимых для решения дифференциального уравнения динамики.

Класс «Space» – используется для создания отдельной расчетной точки реактора. Содержит набор параметров, характеризующих его объем и массу.

Имеет три конструктора для создания объектов-точек для трех целей: основной объект-точка, временный объект и объект-точка для перегрузки реактора. Имеет массив «Nuclear», который содержит объекты класса «Изотоп». Имеет методы для установки связей между объектами класса «Изотоп».

Класс «Изотоп» – используется для создания и описания изотопов, содержащихся в конкретной расчетной точке реактора. Содержит данные об основных параметрах изотопов: название, порядковый номер, массовое число, изомерность, масса; также содержит начальное и текущее количество ядер изотопа, константы реакций и распада, название библиотеки в МСNP для проведения стационарного расчета. Имеет массивы, содержащие данные о предшественниках изотопа. Имеет пять объектов класса «sum» и набор методов, использующих функции модуля «МатАн», для расчета своего состояния в зависимости от времени.

Класс «Neutron» – содержит данные для нейтронного расчета: вычисления коэффициента размножения, поглощения и эмиссии нейтронов, мощности реактора и выгорания топлива в целом по реактору и для конкретного объекта класса «Space».

Класс «List» используется для создания объекта, который содержит данные о необходимости проведения конкретного расчета. Например, расчета изменения поглощения нейтронов в ксеноне <sup>135</sup>Хе в центральной ТВС во времени.

Класс «Result» позволяет выводить результаты расчетов и промежуточные результаты в соответствующие файлы и окно программы, также позволяет переписать модель для программы MCNP с учетом результатов на определенный момент времени работы реактора.

Программа MC-Delta имеет собственный набор необходимых данных, которые не требуют расчетов, либо приняты как константы:

- массы изотопов;

– энергии деления делящихся элементов;

– независимый выход продуктов реакции деления для делящихся нуклидов <sup>232</sup>Th, <sup>233</sup>U, <sup>235</sup>U, <sup>238</sup>U, <sup>239</sup>Pu, <sup>240</sup>Pu и <sup>241</sup>Pu;

– константы распада и спонтанного деления элементов;

- список изотопов, которые необходимо просчитывать в программе;

- список библиотек MCNP, которые следует использовать для пересчета модели.

Для запуска откомпилированной программы необходимо, чтобы в директории с ней находились папки common data, inp, MCNP.

Папка common data содержит файлы данных о выходе продуктов деления изотопов тория <sup>232</sup>Th, изотопов урана <sup>233</sup>U, <sup>235</sup>U, <sup>238</sup>U и изотопов плутония <sup>239</sup>Pu, <sup>240</sup>Pu, <sup>241</sup>Pu, данные о типах распадов и их константах распада радиоактивных изотопов, данные об энергии деления делящихся изотопов, данные о массе изотопов и константы спонтанного деления, файл с перечислением изотопов, учитываемых в расчете.

В директории MCNP содержатся файлы с библиотеками MCNP.

Директория inp содержит директории с моделями. Название директорий

моделей произвольное, и в самих директориях моделей обязательно содержатся два входных файла: Model и Data.

Первый файл (Model) используется для расчета в MCNP. Кроме того, что на первый файл накладываются условия построения модели в MCNP, программа MC-Delta накладывает дополнительные условия на присвоение номеров ячеек, номеров материальных карт и стиля написания материальных карт.

Второй файл (Data) используется для задания параметров кампании и для установки перед программой определенной задачи расчета.

Результаты расчетов (общие данные кампании: изменение коэффициента размножения, мощности в зависимости от времени) выводятся в отдельный файл. Используется масштаб времени, который указывается в строке Time файла данных. Приводится выгорание, выработанное количество энергии и мощность в конце расчета.

Далее следуют результаты расчетов заданных в строках Space:n. Подписываются ячейки, для которых был проведен расчет, номера изотопов и номера реакций, для которых выводятся данные. Масштаб времени и временные точки вывода результатов те же, что и для вывода общих данных.

Погрешности, возникающие в ходе нейтронно-физических расчетов, обусловлены многими факторами, например, связанными с заданной статистикой при постановке задачи, точностью построения модели. Основные погрешности расчетов по программе MCNP связаны с погрешностями используемых констант. Эти ошибки переносятся в программу MC-Delta.

Кроме систематической погрешности, при проведении расчетов важно знать относительную погрешность получаемых результатов. При расчете нейтронных реакций погрешность может достигать 100 % для реакций, которые редко протекают в активной зоне, и не влияют на основные результаты. Для реакций, имеющих первостепенное значение при расчете кампании реактора и расчете пространственного распределения мощности, такая погрешность может быть сведена к уровню менее 1 %.

Погрешность расчета кампании реактора также образуется переносом систематических и относительных ошибок при задании исходных данных.

С помощью программы MC-Delta можно проводить расчеты энергетических реакторов. В ней учитывается 20 цепочек образования продуктов деления и шлаков, в которые входит 140 элементов продуктов реакций и их распада и 37 элементов, способных к делению или к образованию делящихся нуклидов. Указанное количество цепочек и элементов достаточно для проведения качественных расчетов и не является методическим или программным ограничением [43].
# 2.3. Теплофизический расчет характеристик теплообменного оборудования

2.3.1 Совершенствование классического метода расчета теплообменных аппаратов

Расчет теплофизических, гидравлических конструкционных И характеристик теплообменного оборудования газоохлаждаемого реактора по методикам [28–32] отнимает значительное количество времени И вычислительных ресурсов. При этом необходимо выполнить не один десяток для получения представительных расчетов итерационных результатов. Существуют различные специализированные программы [44, 45], но их применение ограничено многими факторами. Поэтому в рамках данного целесообразным решением является разработка научного исследования собственной программы, которая будет удовлетворять всем необходимым требованиям. После анализа литературных и справочных данных [46] автором в среде объектно-ориентированного программирования Borland Delphi 7 [47] была разработана программа HeatEx, вид которой показан на рисунке 6.

2	I	leatEx		_ =	×	🍞 HeatEx-Parvo95 – 🗆 🗙
Конструкционный расчет		Тепловой баланс / Ги	дравлически	й расчет		Давление, бар Температура, С 11 174
Параметр	Значение ^	Вода		•		
Наружный диаметр, мм	8	Эля греющего С Дл	ія нагреваемого			Фазовое состояние Недогретая вода Относительная антальлия -0.02214462625106171
Толщина стенки, мм	1	Готов	0			Давление [бар] 11
Длина трубы, мм	2000	Параметр / Теплоноситель	Греющий	Нагреваемый	<u>^</u>	Температура [С] 174
Количество труб	37	Давление,бар	11	11		Энтальпия (кДж/кг) 736.7467465004918 Плотиость (кг/ма) 893.4729222860692
Шаг решетки (1.2-1.5), мм	1.5	Расход,кг/с	2.85	0.252		Удельный объем [м3/кг] 0.001119228098643848
Кол-во трубок во внешнем кольце, мм	18	Среда	Не выбрано	Не выбрано		Внутренняя энергия [кДж/кг] 735.5155955919836
Диаметр кожуха, мм	92.0	Т1 на входе, С	182	33		Энтропия [кДж/(кг*С)] 2.080562824772349
Площадь теплообмена, м2	1.627	Т2 на выходе, С	170	174		Изосарная теплоемкость (кДж/(кг*С)) 4.361126220702477 Изохорная теплоемкость (кДж/(кг*С)) 3.419186523673885
Число рядов по радиусу	3	Т средняя, С	176	103.5		Коэффициент изоэнтропы 1611.963899206898
F трубного пространства, м2	0.0010462	і1 энтальпия на входе	771.920	139.26		Теплопроводность [Вт/м*С] 0.6758312988263547
F межтрубного пространства, м2	0.0047878	і2 энтальпия на выходе	719.250	736.75		КИНЕМАТИЧЕСКАЯ ВЯЗКОСТЬ [M2/C] 1.7420011939287088-00 Линаммиеская вязкость [Па*c] 0.0001557020589494055
		ср, кДж/кг*С	0	0		Критерий Прандтля 1.00935053713751
		Мощность, кВт	0	0		Скорость звука [м/с] 1408.747961485933
		В трубках?	•	0	1	Коэфф. поверхностного натяжения [н/м] 0.04351868809/53/51 Темп. коэфф. объемиого расширения [1/С] 0.00117954465434674
		Плотность, кг/м3	891.36	956.28		Теплота парообразования [кДж/кг]
		Теплопроводность, Вт/м*С	0.675	0.68068		
		Динамич. вязкость, Па*с	0.0001538	0.0002720		Packet B Parvo
		Критерий Прандтля	0.9999600	1.6852		
		Скорость теплонос., м/с	0	0		
		Критерий Нуссельта	0	0		
		Число Рейнольдса	0	0		
		Теплоотдача,Вт/(м2*К)	0	0		
		Температурный напор	0	0	~	
	1		-			
Расчет		Расчет До	полнительнь	не параметры	ы	

Рисунок 6 – Окно программы HeatEx

Данная программа объединяет в себе необходимые методы и средства для решения задачи расчета характеристик теплообменников, позволяя в кратчайшие сроки получать хорошо согласованные результаты. Особенностью данной программы является то, что в ней реализована автоматическая выборка значений параметров воды и пара, найденных по программе [31]. Такая возможность позволяет получать требуемые характеристики и применять их для последующих расчетов. Пользовательский интерфейс программы максимально упрощен для обеспечения максимальной функциональности. В первую очередь задаются условия для конструкционного расчета, затем для тепло гидравлического расчета. Программа отслеживает действия пользователя и предупреждает возможные ошибки ввода данных. По результатам расчета пользователь получает значение площади теплопередающей поверхности, коэффициенты подобия и прочие тепловые характеристики.

#### 2.3.2 Метод конечных элементов

МКЭ основан на нескольких принципах, которые хорошо описаны в специальной литературе [84, 100, 105, 106]. Во-первых, область исследования делится на подобласти (конечные элементы). В каждом конечном элементе неизвестная функция аппроксимируется простой функцией, обычно полиномом малой степени. При таком представлении неизвестной функции параметры аппроксимации становятся неизвестными значениями, которые необходимо найти. Подстановка приближений в исходные уравнения дает систему для параметров приближения, которые называются нахождения узловыми значениями. Это значения узлов, которые неизвестны и также называются степенями свободы. В зависимости от рассматриваемой задачи, степени свободы могут быть составляющими скорости, перемещения, напряжения, температуры и других величин. Результирующая система для определения значений степеней свободы получается либо путем минимизации функции, соответствующей математической постановке задачи (в механике, например, минимизируется потенциальная энергия системы), либо с помощью метода Галеркина. метод. Метод Галеркина определяет требование ортогональности невязки и выбранных функций аппроксимации. МКЭ был разработан для решения уравнений теории упругости и строительной механики. Это важно, когда необходимо учитывать геометрические особенности областей, поскольку граничные условия вдоль стороны треугольника или прямоугольника намного легче установить, чем в то же время вдоль всей границы области. Следует отметить, что точность расчета увеличивается за счет более мелкого разделения площади. Однако возникает недостаток МКЭ - требования к вычислительной мощности главный компьютера.

Суть метода вытекает из его названия. Область, в которой ищется решение дифференциальных уравнений, разбивается на конечное число подобластей (элементов). В каждом из элементов форма аппроксимационной функции выбирается произвольно. В простейшем случае это многочлен первой степени. Вне своего элемента функция аппроксимации равна нулю. Значения функций на границах элементов (в узлах) являются решением проблемы и заранее не известны. Коэффициенты аппроксимирующих функций обычно ищутся из условия равенства значений соседних функций на границах между элементами (в узлах). Затем эти коэффициенты выражаются как значения функций в узлах алгебраических элементов. Составлена система линейных уравнений. Количество уравнений соответствует количеству неизвестных значений в узлах,

в которых ищется решение исходной системы, прямо пропорционально количеству элементов и ограничено только возможностями компьютера. Поскольку каждый из элементов связан с ограниченным числом соседних элементов, система линейных алгебраических уравнений имеет разреженный вид, что значительно упрощает ее решение.

В терминах матрицы собраны так называемые матрицы жесткости (или матрицы Дирихле) и массы. Затем на эти матрицы накладываются граничные условия (например, при условиях Неймана в матрицах ничего не меняется, а при условиях Дирихле из матриц удаляются строки и столбцы, соответствующие граничным узлам, так как значение соответствующих Компонентов решения известно). Затем собирается система линейных уравнений и решается одним из известных методов.

С компьютерной точки зрения идея метода конечных элементов заключается в том, что функция вариационной задачи минимизируется на ряде функций, каждая из которых определяется в своей собственной подобласти. Для численного анализа системы мы можем рассматривать ее как один из конкретных разделов диакоптики - общего метода изучения систем путем их расчленения.

Современные системы МКЭ: T-FLEX analysis - универсальная система анализа КЭ со встроенным пре / постпроцессором; APM WinMachine 2010 проектирования универсальная система для И расчета В области машиностроения, включая анализ КЭ со встроенным препроцессором / постпроцессором; APM Civil Engineering 2010 - универсальная система анализа КЭ с интегрированной предварительной / последующей обработкой для проектирования и расчета металлических, железобетонных, стальных и деревянных конструкций; ABAQUS - универсальная система анализа КЭ с интегрированной предварительной / постобработкой; ANSYS это универсальная система анализа КЭ с интегрированной предварительной / постобработкой и прочими.

### 2.3.3 Применение метода конечных элементов

Сегодня область применения МКЭ очень широка и охватывает все физические задачи, которые могут быть описаны дифференциальными уравнениями. Данные метод лежит в основах решателей многих программных продуктов [42–45]. Наиболее известные из них: программный комплекс Ansys, Comsol Multiphysics, Flow3D. Основными преимуществами метода конечных элементов являются следующие: свойства материалов смежных элементов не должны быть обязательно одиночными. Это позволяет применять метод к телам, составленных из нескольких материалов; криволинейная область аппроксимирована с помощью прямолинейных элементов или описана точно с помощью криволинейных элементов.

Таким образом, метод можно использовать не только для областей с "комфорной" формой границы. - размеры элементов могут быть переменными.

Это позволяет укрупнить или измельчить набор разбиения области на элементы, если в этом есть необходимость.

Указанные выше преимущества метода могут быть использованы при составлении достаточной общей программы для решения частных задач определенного класса.

Главный недостаток метода конечных элементов заключается В необходимости составления вычислительных программ И применения вычислительной техники. Вычисления, которые требуются провод при использовании метода конечных элементов, слишком громоздки для ручного счета да в случаях решения очень простых задач. МКЭ является очень ресурсоемким методом с точки зрения затрат вычислительных ресурсов.

Автором данного диссертационного исследования метод конечных элементов хорошо изучен и регулярно применяется на практике при решениях широкого Спектра задачи, в том числе связанных с безопасностью заражения хорошего качества. Для этого используется лицензионное программное обеспечение Ansys Fluent, предназначенное для решения задач теплогидравлики.

Так, в работе [48] представлены результаты моделирования штатных режимов работы тепловыделяющей сборки быстрого реактора на стационарном уровне мощности. Помимо этого, данный метод активно применяется при проведении расчетных исследований аварийных ситуаций [49], сопровождающихся ростом энергии в топливе экспериментального устройства, прекращения использования элементов.

Результаты применения метода конечных элементов для моделирования теплового состояния тепловыделяющей сборки газоохлаждаемого реактора и теплообменного оборудования, а также результаты расчета элементов конструкции установки исследования процессов парообразования и перегрева пара представлены в последующих оригинальных главах.

## **З ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ** ГАЗООХЛАЖДАЕМОГО РЕАКТОРА С ВОДНЫМ ЗАМЕДЛИТЕЛЕМ

В данном разделе приведены особенности предлагаемой конструкции и характеристики, исследуемого газоохлаждаемого реактора и компьютерной расчетной модели. Предлагаемые технические решения расширяют привычные представления о конструкции реакторов подобного типа, так как в данном реакторе объединены преимущества лучших на сегодняшний день энергетических реакторов типа ВВЭР-1000 и перспективных проектов ВТГР. Основные результаты, приведенные в данном разделе, были представлены автором на конференциях [50,51,52,59,73] и опубликованы в научных журналах [53,54, 62, 63].

#### 3.1 Особенности конструкции и основные характеристики

На заре развития атомной энергетики в качестве перспективных вариантов рассматривались различные типы реакторов. Среди них были реакторы с органическим теплоносителем, с теплоносителем на основе диссоциирующей N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> [55], тяжеловодные и графитовые реакторы с газовыми теплоносителями [56]. Однако указанные типы реакторов дальнейшего развития не получили по разным причинам.

В настоящее время реакторы с газовым теплоносителем рассматриваются в варианте с циклом Брайтона и графитовым замедлителем [56,57]. Несмотря на достаточно большой срок разработки таких реакторов и представление их в качестве лидеров завтрашней атомной энергетики эффект от их внедрения не наблюдается.

В работе [58] показано, что в тяжеловодных реакторах с газовым теплоносителем достижим термодинамический КПД на уровне 45,6 % при нагреве теплоносителя до 500 °C, что возможно с использованием хорошо отработанных стержневых твэлов. Эффект достигается за счет полного использования энергии деления ядер, в том числе энергии замедления нейтронов, высокого давления пара в цикле Ренкина и тройного перегрева пара [59]. Положительным качеством данного цикла является высокая сухость отработанного пара (на уровне 93 % против порядка 70 % в турбинах легководных реакторов), что снижает затраты на изготовление лопаток турбины [60].

Преимущества тяжеловодных реакторов в полной мере могут быть использованы, как и быстрых реакторов, при включении замкнутого топливного цикла с переработкой отработавшего топлива. В противном случае, их достоинства приближаются по величине к недостаткам – дороговизне тяжелой воды, осложнении в эксплуатации систем циркуляции тяжелой воды, большими габаритами активной зоны. Технология переработки отработавшего топлива внедряется малыми темпами. Имеются факторы как технического, так и экономичекого характера для такого сдерживания [61].

В настоящих расчетных исследованиях показаны возможности газоохлаждаемого реактора с водным замедлителем, в том числе и с простой водой в качестве замедлителя, построенного на основе некоторых технических решений [62].

Рассмотрим реактор с тепловой мощностью 1000 МВт. Поскольку в реакторе используются разнородные теплоноситель и замедлитель, реактор выполнен канального типа. Большая замедляющая способность легкой воды в сравнении с тяжелой делает шаг решетки размещения каналов небольшим. Если в тяжеловодном реакторе он превышает 25 см, то в рассматриваемом реакторе с простой водой установлен шаг треугольной решетки ~12 см. В активной зоне установлено 549 ТВС с внешним диаметром корпуса 10 см. Диаметр активной зоны составляет 3,0 м, высота топлива в TBC – 2,2 м. В каждой TBC установлено 59 твэлов с внешним диаметром 6,8 мм [63].

Давление замедлителя установлено равным 2,5 МПа, давление теплоносителя на входе в ТВС – 6,0 МПа. В качестве теплоносителя используется гелий.

Температура замедлителя на входе в активную зону равна 200 °C, на выходе 210 °C, недогрев до температуры кипения на выходе из активной зоны составляет порядка 14 °C.

Схема реактора представлена на рисунке 7. Подача теплоносителя в каналы с ТВС осуществляется снизу-вверх с помощью интегральных коллекторов [64]. Над верхним интегральным коллектором размещается цилиндрическая камера с диаметром равным диаметру активной зоны и высотой равной высоте ТВС, обеспечивающая возможность перестановки ТВС.



Рисунок 7 – Схема газоохлаждаемого реактора с водным замедлителем [63]

Система регулирующих стержней в представленном варианте размещается снизу активной зоны. Аналогом такого решения является система регулирования кипящего реактора ABWR [65]. Возможна обратная компоновка, когда камера

перестановки ТВС размещается под активной зоной, а система регулирования над нею. В таком варианте потребуется большая высота подреакторных помещений.

## **3.2** Расчет нейтронно-физических характеристик активной зоны газоохлаждаемого реактора

3.2.1 Модель активной зоны реактора для нейтронно-физических расчетов

Основные размерно-материальные характеристики модели реактора с газовым теплоносителем, представлены в таблицах 1,2 и 3. В период проведения расчетных поисковых исследований в области выбора и обоснования конфигурации активной зоны газоохлаждаемого реактора было проделано огромное количество нейтронно-физических расчетов. В рамках данного диссертационного исследования приводятся наиболее значимые из них.

Таблица 1	– Исхолные	ланные для	моделирован	ИЯ ТВЭЛОВ	реактора
		<b>D</b>			

		1			
Параметр		Значение			
Количество ТВЭЛ, шт		32 391			
Конс	трукционная ха	рактеристика твэлов			
Высота, см			220		
Радиус, см			0,345		
Толщина оболочки, см		0,04			
Радиус цилиндра, занятого тог	іливом, см	0,295			
Радиус центрального	цилиндра,		0.00		
заполненного гелием, см			0,09		
Мат	ериальный сост	ав оболочки тва	ЭЛОВ		
Материал	Плотнос	юсть, г/см <sup>3</sup> Масса, т			
Цирконий 0,99 %	6.5 2.791		2 791		
Ниобий 1 %	0,	5	5,781		

Таблица 2 – Исходные данные для моделирования ТВС реактора

	11 11	1	1 1			
Параметр		Значение				
Количество ТВС, шт		549				
Кон	струкционная ха	арактеристика ТВС				
Количество твэлов в одной ТЕ	ВС, ШТ	59				
Высота, см		220				
Радиус, см		4,7				
Толщина оболочки, см		0,3				
Ma	териальный сост	гав оболочки Tl	BC			
Материал	Плотность, г/см <sup>3</sup>		Масса, т			
Цирконий 99 %	64	5	6 720			
Ниобий 1 %	0,.	)	0,729			

Таблица 3 – Исходные данные для построения модели активной зоны реактора с газовым теплоносителем

Параметр	Значение				
Конструкция а	ктивной зоны				
Шаг размещения ТВС в активной зоне	12	16			
(треугольная решетка), см	12				
Высота, см	220	220			
Радиус, см	152	202			
Боковой отражатель					
Высота, см	42	20			
Толщина, см	10	00			
Верхний/нижн	ий отражатель				
Высота, см	10	00			
Радиус, см	252	302			
Материальный сос	тав теплоносителя				
Вид теплоносителя	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Масса, т			
Гелий (Не)	0,955 13,559				

Были просчитаны 8 вариантов модификации реактора с газовым теплоносителем мощностью 1000 МВт. Их основные различия представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Рассматриваемые расчетные варианты конструкции АЗ реактора

Варианты	1	2	3	4	5	6	7	8
Топливо		UM		UO <sub>2</sub>				
Шаг размещения ТВС в активной зоне, см	1	2	-	16	]	12	-	16
Обогащение по U <sup>235</sup> , % 2,5								
Замедлитель / отражатель	$D_2O$	H <sub>2</sub> O	D <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O	D <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O	D <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O

Данные о используемом топливе и замедлителе отображены в таблице 5. Основными вариантами являлось топливо на основе металлического урана и его диоксида.

Таблица 5 – Характеристики топлива, замедлителя и отражателя

Параметр	Топ.	ПИВО	Замедлитель / Отражатель				
	LIMOT	LIO.	H <sub>2</sub> O		$D_2O$		
	UMET	$00_2$	12	16	12	16	
Плотность,г/см <sup>3</sup>	8,89	10,5	0,9	017	0,9	917	
Масса, т	15,7	16,3	63	95,6	63	95,6	

Расчетная модель данного реактора для проведения нейтронно-физических расчетов была создана нами в среде программы MCNP5 [34], реализующей для моделирования траектории движения нейтронов метод Монте-Карло, который описан в предыдущем разделе. Программа имитирует взаимодействия с участием нейтронов, фотонов и электронов, а также реакции ядерного распада с

использованием микроконстант с детальной энергетической зависимостью на базе библиотеки ENDF/B-VI [66].

Конструкция активной зоны газоохлаждаемого реактора одинакова для вариантов как с тяжеловодным замедлителем, так и с легководным.

Вертикальное сечение построенной модели представлено на рисунке 8.



1 – боковой отражатель, 2 – верхний отражатель, 3 – активная зона; 4 – нижний отражатель

Рисунок 8 – Вертикальное сечение модели реактора

Каждая ТВС состоит из твэлов, размещенных в пять рядов: в первом ряду находится 1 твэл, во втором – 6, в третьем – 12, в четвертом – 18, в пятом – 22. Каждый твэл, в свою очередь, разбит на 11 частей по высоте (по 20 см каждая) для графического представления энерговыделения по всей высоте твэла.

Горизонтальное сечение модели ТВС и ее расположение в треугольной решетке активной зоны реактора показано на рисунках 9 и 10. Горизонтальное сечение модели твэла представлено на рисунке 11.



Рисунок 9 – ТВС в шестигранной ячейке АЗ



1 – оболочка ТВС; 2 – теплоноситель; 3 – твэл Рисунок 10 – Сечение модели ТВС реактора



1 – оболочка твэла; 2 – гелиевый зазор; 3 – гелий; 4 – топливная композиция Рисунок 11 – Конструкция твэла

3.2.2 Результаты нейтронно-физических расчетов

Проведен расчет характеристик вариантов реактора, отличающихся видом замедлителя, топлива, шагом треугольной решетки ТВС [67].

На основе данных, полученных в результате проведенного расчета моделей в программе MCNP5, рассчитывается реактивность и относительная погрешность измерения эффективного коэффициента размножения каждого конкретного варианта реактора. Реактивность реактора определяется по формуле:

$$\rho_{\beta} = \frac{k_{\mathrm{b}\phi\phi} - 1}{k_{\mathrm{b}\phi\phi} \cdot \beta_{\mathrm{b}\phi\phi}} \tag{3.1}$$

где  $k_{iij}$  – эффективный коэффициент размножения;

β<sub>эфф</sub> – суммарная эффективная доля выхода запаздывающих нейтронов, которая для данного реактора принята равной 0,0064.

Для определения относительной погрешности измерения эффективного коэффициента размножения используется формула

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{\beta_{\vartheta \phi \phi}} \tag{3.2}$$

где *σ* – стандартная программная погрешность MCNP5.

В результате проведенного расчета рассматриваемого реактора были получены данные, которые отображены в сравнительной таблице 6.

	№ варианта							
Параметр	1	2	3	4	5	6	7	8
				Знач	ение			
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Коэффициент размножения	1,126	1,201	1,385	0,832	1,091	1,205	1,361	0,839
Относительная погрешность, %	0,61	0,28	0,17	-	0,7	0,27	0,24	-
Реактивность, β	17,43	26,11	43,45	-	13,06	26,59	41,45	-
Утечка нейтронов, %	7,8	10-3	4,88	10-3	7,81	9·10 <sup>-4</sup>	4,74	5.10-4
Деление на тепловых нейтронах, %	76,92	90,99	88,17	93,05	76,67	90,87	87,83	92,96
Деление на быстрых нейронах, %	5,2	4,56	2,87	4,40	5,33	4,58	2,94	4,41
		Коли	чество ре	акций дел	іения			
На ядрах <sup>235</sup> U, %	43,87	46,99	55,23	32,62	42,49	47,21	54,25	32,92
На ядрах <sup>238</sup> U, %	2,015	1,966	1,411	1,328	2,004	1,972	1,412	1,337
		Количе	ство реак	ций погло	ощения			
В дейтерии <sup>2</sup> Н, %	0,581	-	0,47	-	0,580	-	0,456	-
В протии <sup>1</sup> Н, %	-	25,25	-	50,2	-	24,18	-	49,42

Таблица 6 – Результаты расчета восьми вариантов активной зоны реактора

Продолжение таблицы 6

1		2	3	4	5	6	7	8	9
В кислоро <sup>16</sup> О, %	оде	0,424	0,281	0,451	0,333	0,551	0,412	0,535	0,424
В	<sup>90</sup> Zr	0,581	0,264	0,344	0,15	0,549	0,264	0,341	0,149
циркони и, %	<sup>91</sup> Zr	0,242	0,113	0,19	0,07	0,236	0,108	0,183	0,069
В ниобии %	<sup>93</sup> Nb,	0,443	0,154	0,284	0,084	0,431	0,149	0,278	0,085
B <sup>235</sup> U, %		10,20	8,865	11,09	5,945	9,925	8,923	10,96	6,005
B <sup>238</sup> U, %		34,20	16,19	26,01	9,313	35,77	16,87	27,21	9,639

3.2.3Расчет вариантов кампании реактора

На рисунке 12 приведено изменение содержания делящихся веществ в кампании реакторов (Таблица 7) с замедлителем в виде простой и тяжелой воды с начальным содержанием <sup>235</sup>U 2,5 % в металлическом и диоксидном топливе с переменным шагом расстановки ТВС 12 и 16 см [68,69].





Вариант 1: шаг размещения ТВС в активной зоне – 12 см, замедлитель – тяжелая вода, топливо – металлический уран

<sup>235</sup>U, KT







Вариант 5: шаг размещения ТВС в активной зоне – 12 см, замедлитель – тяжелая вода, топливо – диоксид урана

50 <del>द</del>्र

239 PII.





Вариант 7: шаг размещения ТВС в активной зоне – 16 см, замедлитель – тяжелая вода, топливо – диоксид урана

## Рисунок 12 – Изменение содержания делящихся веществ в кампании рассматриваемых вариантов реактора

Образование делящихся веществ не происходит в кампании реакторов:

- с шагом размещения ТВС в активной зоне – 16 см, замедлителем – обычная вода, с начальным содержанием <sup>235</sup>U 2,5 % и топливом в виде U (четвертый вариант);

– с шагом размещения TBC в активной зоне – 16 см, замедлителем – обычная вода, с начальным содержанием  $^{235}$ U 2,5 % и топливом в виде UO<sub>2</sub> (восьмой вариант).

Это связано с тем, что их эффективные коэффициенты размножения равны 0,832 и 0,839 соответственно. Оба коэффициента меньше единицы (плотность потока нейтронов последовательно сменяющих друг друга поколений уменьшается), цепная реакция деления не поддерживается, реакторы подкритичны и их мощность с течением времени падает.

На рисунке 13 показано выделение энергии в твэле каждого рассматриваемого варианта реактора. Данные кривые энерговыделения демонстрируют выделение энергии как по высоте твэла, так и по рядам, в которых они расположены в ТВС.





Вариант 1: шаг размещения ТВС в активной зоне – 12 см, замедлитель – тяжелая вода, топливо – металлический уран







юй Вариант 4: шаг размещения ТВС в активной зоне – 16 см, замедлитель – обычная вода,



Вариант 6: шаг размещения ТВС в активной зоне – 12 см, замедлитель – обычная вода, топливо – диоксид урана

Вариант 3: шаг размещения ТВС в активной зоне – 16 см, замедлитель – тяжелая вода, топливо – металлический уран



Вариант 5: шаг размещения ТВС в активной зоне – 12 см, замедлитель – тяжелая вода, топливо – диоксид урана





Вариант 8: шаг размещения ТВС в активной зоне – 16 см, замедлитель – обычная вода, топливо – диоксид урана

Рисунок 13 – Распределение энерговыделения по высоте твэла по рядам их размещения в ТВС

		Значение						
Параметр				№ вар	ианта			
	1	2	3	4	5	6	7	8
Глубина								
выгорания,	19,92	18,19	45,62	~10 <sup>-14</sup>	15,92	18,79	45,40	~10 <sup>-14</sup>
МВт•сут/кг								
Кампания, сут	313	373	1105	-	251	399	1086	-
Количество <sup>235</sup> U								
в начале				4(	00			
кампании, кг								
	Коли	чество ур	ана и плу	тония в к	онце камі	ании		
<sup>235</sup> U, кг	131,1	116,7	8,484	387,6	173,3	117,7	10,74	401,6
<sup>238</sup> U, кг	15021	15147	14689	15310	15614	15684	15216	15864
<sup>239</sup> Pu, кг	90,39	33,15	64,59	0	95,61	36,12	70,89	0
<sup>241</sup> Pu, кг	21,99	8,123	20,71	0	18,14	9,036	22,80	0

Таблица 7 -	– Характе	ристики	кампании	реакто	ba
		P		p • • • • • • • •	~ ~-

3.2.4 Анализ полученных результатов расчета вариантов активной зоны

На графиках (рисунок 13) показана неравномерность распределения плотности потока тепловых нейтронов по каждому ряду твэлов в ТВС.

По общему виду кривых все графики можно разделить на три группы:

I группа:

– с шагом размещения ТВС в активной зоне – 12 см, замедлителем – тяжелая вода, с начальным содержанием <sup>235</sup>U 2,5 % и топливом в виде U (первый вариант);

– с шагом размещения TBC в активной зоне – 12 см, замедлителем – тяжелая вода, с начальным содержанием  $^{235}$ U 2,5 % и топливом в виде UO<sub>2</sub> (пятый вариант);

II группа:

- с шагом размещения TBC в активной зоне - 12 см, замедлителем - обычная вода, с начальным содержанием <sup>235</sup>U 2,5 % и топливом в виде U (второй вариант);

– с шагом размещения TBC в активной зоне – 12 см, замедлителем – обычная вода, с начальным содержанием  $^{235}$ U 2,5 % и топливом в виде UO<sub>2</sub> (четвертый вариант);

- с шагом размещения ТВС в активной зоне – 16 см, замедлителем – обычная вода, с начальным содержанием <sup>235</sup>U 2,5 % и топливом в виде U (шестой вариант);

– с шагом размещения TBC в активной зоне – 16 см, замедлителем – обычная вода, с начальным содержанием  $^{235}$ U 2,5 % и топливом в виде UO<sub>2</sub> (восьмой вариант);

III группа:

– с шагом размещения ТВС в активной зоне – 16 см, замедлителем – тяжелая вода, с начальным содержанием <sup>235</sup>U 2,5 % и топливом в виде U (третий вариант);

– с шагом размещения ТВС в активной зоне – 16 см, замедлителем – тяжелая вода, с начальным содержанием <sup>235</sup>U 2,5 % и топливом в виде UO<sub>2</sub> (седьмой вариант).

Данные группы, объединенные по общему виду распределения энерговыделения по высоте твэла, имеют близкие по значению величины эффективного коэффициента размножения, утечки нейтронов, деления на тепловых и быстрых нейтронах, на ядрах делящихся материалов, поглощения в топливной композиции и конструкционных материалах реактора (таблица 7).

Первый и пятый варианты, характеризуются самым большим значением утечки и поглощения нейтронов в делящемся материале – <sup>235</sup>U и <sup>238</sup>U.

Распределение энерговыделения практически по всей высоте ТВС равномерно. Из-за малого шага размещения ТВС рожденные нейтроны не успевают замедлиться в пределах активной зоны до энергии тепловых и вылетают отражатель, окружающий зону сверху и снизу, откуда уже замедлившись, возвращаются в активную зону. В связи с этим и наблюдается рост энерговыделения на концах твэлов – «концевые эффекты».

Второй, четвертый, шестой, восьмой варианты (II группа) характеризуются самым малым значением утечки, поглощения нейтронов в делящемся материале. В данных вариантах замедлитель и отражатель выполнены в виде обычной воды, которая характеризуется высокой скоростью замедления нейтронов. Протий, входящий в состав воды сильно поглощает тепловые нейтроны (поглощение колеблется от 24,14 % до 50,2 %). Все нейтроны замедляются в пределах активной зоны.

Третий и седьмой варианты (III группа) характеризуются средним значением утечки и поглощения в делящемся материале по сравнению с предыдущими двумя группами. На кривых, представляющих энерговыделение рассматриваемых вариантов реактора с газовым теплоносителем, показан рост значений энерговыделения в центре твэла благодаря достаточному шагу размещения ТВС в активной зоне, отображено наличие концевых эффектов, что связано природой замедлителя / отражателя (аналогично I группе).

Восемь различных модификаций реактора с газовым теплоносителем мощностью 500 МВт были рассчитаны для выбора оптимального варианта комбинации топлива, замедлителя / отражателя и шага размещения ТВС в активной зоне.

Топливо, и Uмет, и UO<sub>2</sub>, во всех просчитанных вариантах, низкообогащённое – обогащение 2,5 % по изотопу <sup>235</sup>U, что выгодно с экономической стороны.

Теплоноситель в рассматриваемых вариантах реактора – гелий, который в свою очередь обладает следующими преимуществами:

- отсутствие фазового перехода в диапазоне высоких температур;

– низкая температура плавления;

- малое коррозионное воздействие на конструкционные материалы;

- стабильность свойств под воздействием излучения и температуры;

– малая аварийная опасность и опасность, вызванная наведенной активностью;

– отсутствие неблагоприятного влияния на баланс нейтронов в реакторе.

Из просчитанных вариантов наиболее лучшими критериями обладают реакторы, в которых:

– топливом является металлический уран, замедлитель / отражатель – тяжелая вода, шаг размещения ТВС в активной зоне – 16 см;

– топливом является диоксид урана, замедлитель / отражатель – тяжелая вода, шаг размещения ТВС в активной зоне – 16 см.

Из этих двух можно выделить первый реактор на металлическом уране (рассчитанный третий вариант, таблица 7), который обладает рядом преимуществ:

– низкообогащенное топливо (2,5 % по изотопу  $^{235}$ U);

– ТВС предлагаемого реактора не содержит теплового экрана, что снижает затраты на её создание, затраты на прокачку теплоносителя, потери нейтронов, габариты активной зоны;

– требуется около 100 тонн тяжелой воды, что в 2 раза меньше, чем в реакторе CANDU близкой мощности.

По сравнению с другими просчитанными вариантами для этого варианта компоновки активной зоны характерны следующие показатели:

самая продолжительная кампания – 1105 суток);

- наибольшее выгорание делящегося материала (<sup>235</sup>U выгорело 97,8 %);

- наибольшее значение глубины выгорания – 45,62 MBT · сут/кг;

– доля использования природного урана (1,24 %) достигает значения, характерного для реакторов CANDU, лучших из тепловых реакторов в этом отношении. Однако, в реакторах CANDU достигаемое выгорание примерно в четыре раза ниже, а количество тяжелой воды требует много больших затрат. Предложенная схема реактора и включения его элементов в цикл Ренкина обеспечивает получение термодинамического КПД на уровне свыше 46 % при температуре нагрева газа 500 °C, максимальном давлении пара 20,0 МПа, использовании хорошо отработанных стержневых твэлов.

Необходимость использования тяжелой воды диктуется тем обстоятельством, что при достаточном количестве простой воды в качестве замедлителя получается малый шаг решетки, который ухудшает возможность создания и обслуживания системы перегрузки ТВС. Положительным фактором при использовании тяжелой воды в смеси вод является снижение потерь нейтронов в протии. Требуемое количество тяжелой воды является небольшим по массе, и, кроме того, стоимость воды с малым содержанием в ней тяжелой воды гораздо меньше, чем стоимость тяжелой воды большого обогащения.

Для примера в реакторе CANDU близкой мощности требуется свыше 200 тонн тяжелой воды, в предлагаемом реакторе около 50 тонн смеси вод при содержании тяжелой около 70 %. Стоимость необходимой водной смеси составляет менее 20 % от стоимости дополнительной годовой выработки электроэнергии за счет повышения КПД от 32 % до 45 %.

#### 3.2.5 Расчет характеристик модернизированной ТВС

Проведены расчеты теплофизических характеристик двух вариантов ТВС с использованием программы [84]. Первый из них выполнен по традиционной TBC канальных реакторов с теплоизоляцией схеме газового тракта теплоносителя, содержащей экран и газовый зазор между трактом теплоносителя и корпусом ТВС. Второй вариант выполнен по упрощенной схеме и не содержит теплового экрана. В нем поток теплоносителя непосредственно соприкасается с корпусом ТВС. В каждом из вариантов ТВС рассмотрена возможность использования твэлов с топливом в виде двуокиси урана и топливом из металлического урана. Были рассмотрены и другие варианты конструкции ТВС.

Варианты ТВС и окружающего их слоя замедлителя представлены на рисунке 14.



1 – замедлитель; 2 – чехол ТВС; 3 – твэл; 4 – тепловой экран Рисунок 14 – Варианты конструкции ТВС с тепловым экраном (слева) и без него (справа) [63]

Исходные данные и результаты расчетов представлены в таблице 8. Данные по характеристикам замедлителя не учитывают энерговыделение за счет замедления нейтронов. Величина этого энерговыделения близка к величине перераспределения тепла из канала упрощенной схемы ТВС без теплового экрана (ТЭ). Реальная скорость потока замедлителя в обоих случаях вырастет. Количество перераспределенного тепла из ТВС останется таким же, которое приведено ниже.

Параметр	Значение				
Тип топлива	U	O <sub>2</sub>	U metal	UO <sub>2</sub>	
Доля D в замедлителе, %	0		70	95	
Шаг размещения ТВС, см		12,0		16	
Тип ТВС	C	гепловым эк	раном	Без ТЭ	
Масса <sup>235</sup> U в начале кампании, кг			403		
К <sub>эфф</sub> , о.е.	1,23	1,196	1,205	1,353	
Утечка, %	0,6	4,2	4,2	2,55	
Поглощение в протии, %	20,85	8,99	8,92	5,86	
Поглощение в <sup>235</sup> U, %	9,18	9,91	10,09	10,6	
Деление на <sup>235</sup> U, %	48,0	46,19	46,15	53,9	
Поглощение в <sup>238</sup> U, %	18,2	28,5	28,1	24,6	
Деление на <sup>238</sup> U, %	2,13	2,5	2,86	1,44	
Длительность кампании, суток	479	462	483	972	
Выгорание топлива, МВт.сут/кг	22,06	25,37	25,74	39,6	
Масса <sup>235</sup> U в конце кампании, кг	91	89,9	83,1	16,5	
Наработка <sup>239</sup> Ри, кг	39,3	62,3	57,8	61,3	
Наработка <sup>241</sup> Ри, кг	11,5	20,9	19,9	20,1	
Доля использования урана, %	0,59	0,682	0,692	1,065	

Таблица 8 – Характеристики кампаний вариантов газоохлаждаемого реактора с водным замедлителем

Температура теплоносителя на выходе ТВС 500 °С достигается без превышения допустимых температур материалов сердечников твэлов и их оболочек во всех вариантах.

Упрощенный вариант ТВС передает до 6 % мощности ТВС в замедлитель, что меньше допустимого значения, разрешенного предлагаемой технологией передачи энергии в цикл Ренкина. При этом обеспечивается экономия энергии на прокачку теплоносителя в реакторе на уровне ~1,7 МВт.

Определена мощность ТВС без теплового экрана, которая может быть передана в замедлитель без прокачки теплоносителя и достижении максимума температуры одного из элементов ТВС. Она составила ~10 кВт, что соответствует энерговыделению продуктов деления спустя сутки после останова реактора.

Помимо представленных вариантов ТВС рассматривались и другие, отличающиеся, например, типом теплоносителя [67,70], однако существенных улучшений характеристик найдено не было.

#### 3.3 Выводы по разделу

В результате проведенных расчетов были получены данные, которые характеризуют работу каждого из рассмотренных вариантов активной зоны реактора. При использовании в качестве и замедлителя и отражателя в реакторе обычной воды выявлены большие потери нейтронов в протии, который является сильным поглотителем тепловых нейтронов.

Применение в реакторе тяжелой воды устраняет поглощение нейтронов в замедлителе и отражателе, при этом в зависимости от концентрации тяжелой воды в простой увеличивает общие капитальные затраты. Полностью отсутствуют потери нейтронов в гелиевом теплоносителе, который является инертным газом.

Вариант активной зоны газоохлаждаемого реактора с замедлителем и отражателем в виде простой воды и шагом размещения TBC 16 см не выходит на критический уровень мощности, так как порядка 24-50 % тепловых нейтронов поглощается протием, а из-за большого шага TBC происходит утечка тепловых нейтронов. Варианты активной зоны, в которых TBC расположены с шагом 12 см, характеризуются самой непродолжительной кампанией, что экономически нецелесообразно. При использовании тяжелой воды и расстановке TBC с шагом 12 см, и обычной воды при шаге TBC 12 и 16 см, ярко выражена неравномерность энерговыделения как по высоте твэла, так и по радиусу TBC.

При применении тяжелой воды в реакторе с расстановкой ТВС 12 см наблюдается рост энерговыделения на концах твэлов, в связи с тем, что быстрые нейтроны, вылетевшие из активной зоны (не успевшие замедлиться до тепловой энергии из-за малого шага решетки активной зоны) в отражатель, возвращаются в ее пределы уже, замедленные тяжелой водой. Обычная вода характеризуется высокой скоростью замедления нейтронов, поэтому при ее применении в качестве замедлителя и отражателя на кривых энерговыделения отсутствуют концевые эффекты (все рожденные нейтроны замедляются до тепловых в пределах активной зоны).

Резюмируя вышесказанное можно сделать вывод о том, что лучшими параметрами и характеристиками обладает компоновка активной зоны газоохлаждаемого реактора, при которой топливом является металлический уран, замедлителем – тяжелая вода, а ТВС размещены с шагом 16 см.

## 4 ТЕПЛООБМЕННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ АЭС НА ОСНОВЕ ГАЗООХЛАЖДАЕМОГО РЕАКТОРА

Данный раздел посвящен исследованию эффективности конструкции теплообменного оборудования реактора. Показаны возможности теплового реактора с высокой эффективностью передачи энергии в контур турбины. Продемонстрированы технические возможности достижения высокой эффективности работы оборудования первого контура. Приведены расчетные модели и данные компьютерного моделирования теплофизических процессов. Основные результаты данного раздела опубликованы в работах [53,54,63,72].

#### 4.1 Пути передачи энергии в цикл Ренкина

Потенциал предлагаемого в настоящей работе технического решения во многом обусловлен схемой передачи тепловой энергии от реактора в цикл Ренкина (рисунок 15). В известных АЭС с газовым теплоносителем и тяжеловодным замедлителем [73] энергия в паровой контур передается только от газового теплоносителя. При этом теряется полностью энергия замедления нейтронов, и энергия утечек тепла из каналов в замедлитель. Суммарные потери могут превышать 10 % от полной энергии, связанной с делением ядер.

Кроме того, высокие требования к минимизации утечек тепла усложняют конструкцию ТВС. В предлагаемом решении энергия замедления и утечек тепла из ТВС передается воде, образованной из отработанного пара турбины [74].



Рисунок 15 – Схема передачи тепловой энергии от реактора в цикл Ренкина [68]

Максимальное давление пара в контуре равно 20,0 МПа, максимальная температура перегрева пара в обоих нагревателях – 500 °C. Температура гелия на выходе из реактора в данной схеме принята равной 615 °C, но она может варьироваться в широких пределах.

Все теплообменники в данной схеме выполнены с противотоком отдающих и принимающих энергию рабочих тел [75]. Схема дополнена емкостью, обеспечивающей защиту ТВС от протечек пара высокого давления в контур газового теплоносителя реактора. При возникновении течи пара высокого давления в контур теплоносителя пар будет расширяться, его давление падать как за счет увеличения объема в дополнительной емкости, так и за счет снижения давления в контуре пара.

В контуре вода-пар установлены два насоса. Первый повышает давление воды до значения равного давлению замедлителя в реакторе, второй – до максимального давления в цикле Ренкина. Это решение упрощает требования к теплообменнику, передающему тепло от замедлителя.

Для обеспечения передачи энергии от замедлителя в цикл Ренкина поднимается давление в замедлителе и его температура. При указанных выше температурах пара и его давлении баланс энергии в цикле Ренкина с тремя перегревами имеет вид, представленный в таблице 9.

Наименование процесса	Диапазон те	Доля энергии, %	
Нагрев воды	31,0	365,7	41,3
Превращение воды в пар	365,7	365,8	14,3
Первый перегрев пара	365,8	500,0	20,1
Второй перегрев пара	300,0	500,0	12,6
Третий перегрев пара	278,3	500,0	11,7
Итого:			100,0

Таблица 9 – Баланс энергии в цикле Ренкина

При давлении, развиваемом первым водным насосом, максимальная температура воды может составить 275 °C, и максимальное количество тепловой энергии, переносимой замедлителем, в этом случае, будет равно ~30,0 % от всей энергии, выделяемой в реакторе. Если энергия замедления нейтронов равна 7 % от общей энергии, то на утечку из ТВС и интегральных коллекторов в замедлитель можно допустить до 23 % энергии, выделяемой в ТВС. Это способствует упрощению конструкции ТВС и интегральных коллекторов. Кроме того, утечка тепла из самой ТВС снижает максимально необходимый расход теплоносителя, а значит и затраты на его прокачку.

#### 4.1.1 Характеристики цикла Ренкина

Была исследована зависимость коэффициента полезного действия от числа контуров перегрева и давления пара в цикле. В расчетах характеристик цикла использовалась разработанная программа HeatEx, а также справочные данные [76]. Представляет интерес зависимость доли энергии, затрачиваемой на подогрев воды от момента её конденсации до точки парообразования, и доли

энергии, затрачиваемой на парообразование от максимального давления пара в цикле. Эти зависимости и зависимость их суммы представлены на рисунке 16. Важным для рассматриваемого технического решения является повышение доли энергии затрачиваемой на подогрев воды с ростом максимального давления. Тем самым, с ростом давления увеличивается возможность переноса энергии в цикл с замедлителем. Хотя и при минимальном давлении пара она достаточно велика.



1 – нагрев воды; 2 – парообразование; 3 – сумма

Рисунок 16 – Зависимости долей энергии, затрачиваемых на нагрев воды, её парообразование и суммы этих долей от максимального давления цикла [63]

Доля энергии, затрачиваемой на парообразование уменьшается, также уменьшается и суммарная доля энергии на нагрев воды и её парообразование. При превращении тепловой энергии цикла в механическую важную роль играет сумма энергий нагрева и парообразования, как "неактивная" часть цикла. В соответствии с этими данными, наблюдается рост термодинамического КПД цикла при повышении давления пара в цикле как показано на рисунках 17, 18.

Были определены зависимости КПД и сухости пара на выходе из турбины от максимальной температуры цикла для случая, когда давление на входе ступеней турбины равны 200, 55 и 12,5 ата. Эти зависимости представлены на рисунке 18. При иных соотношениях давлений КПД и сухость пара меняются незначительно.

Даже при минимальной температуре (400 °C) полный КПД существенно превышает соответствующий КПД наиболее распространенных сейчас водоводяных реакторов, который находится на уровне 32 – 34 %. При максимальной температуре, которая может быть достигнута в ходе оптимизации ТВС и её твэлов, КПД становится близким к значению этого параметра для ВТГР, работающих в цикле Брайтона. При этом они имеют сложную конструкцию твэлов, а суммарная мощность турбины и компрессора в четыре раза превосходит мощность турбины, работающей по циклу Ренкина.



1 – КПД термодинамический, %; 2 – сухость, о.е.; 3 – КПД полный, %

Рисунок 17 – Зависимости термодинамического и полного КПД, удельного объема и сухости пара в конце расширения от максимального давления пара в цикле [63]



1 – КПД термодинамический, %; 2 – КПД полный, %; 3 – сухость, о.е.; 4 – удельный объем, о.е.

Рисунок 18 – Зависимости термодинамического и полного КПД и сухости выходного пара из турбины от максимальной температуры цикла при максимальном давлении 20,0 МПа [63]

## 4.2 Особенности теплообменного оборудования

В данном разделе представлены результаты расчета схемы передачи энергии от реактора в контур турбины, теплофизические и конструкционные расчеты теплообменного оборудования АЭС на основе газоохлаждаемого реактора с водным замедлителем. Передача энергии в цикл Ренкина позволяет достичь КПД на уровне 46%, при этом в сравнении с циклом Брайтона, отсутствует необходимость в высокой температуре пара. Тройной ступенчатый перегрев пара перед каждой ступенью турбины обеспечивает его сухость, что, в свою очередь, позволяет отказаться от легирования лопаток турбины. Применение тонкостенных теплообменных трубок обеспечит высокую теплопередачу, при этом снизит массу и габариты теплообменников реактора.

## 4.2.1 Теплообменные аппараты

Все АЭС с газоохлаждаемыми реакторами выполняются по двухконтурной использованием эффективных паровых турбин схеме с традиционной энергетики [77]. Такой подход значительно упрощает и удешевляет проекты. с гелиевым Создание одноконтурной АЭС теплоносителем пока не представляется возможным, так как в этом случае давление газа будет на уровне 9 МПа. При таком давлении из-за высокой текучести гелия нормальная эксплуатация реактора будет затруднена.

Предлагаемая АЭС на основе газоохлаждаемого реактора так же выполнена по двухконтурной схеме (рисунок 15). Отличительной особенностью является использование энергии замедления нейтронов и утечек тепла из ТВС, тройной перегрев пара до начальных параметров перед каждой ступенью турбины, высокий термодинамический КПД схемы передачи тепла от реактора в контур турбины [78,79].

В исследуемом газоохлаждаемом реакторе схема передачи тепла от реактора к турбине реализована пятью теплообменными аппаратами различной мощности и назначения. Такой подход обеспечивает распределение нагрузки и способствует повышению надежности всего контура. Далее будут представлены результаты расчетов, подтверждающие эффективность такой схемы.

Рассмотрим назначение основных элементов схемы подробнее.

**Подогреватель.** Данный теплообменник мощностью 150 МВт предназначен для предварительного подогрева питательной воды перед производством пара. Особенность этого теплообменника заключается в том, что для подогрева используется энергия замедления нейтронов.

Парогенератор. Парогенератор кожухотрубного типа мощностью 414 МВт. В отличие от парогенератора ВВЭР-1000, в данном парогенераторе отсутствуют сепарационные узлы, что уменьшает его габариты и, следовательно, массу, а также обеспечивает более компактное и плотное размещение трубного пучка.

Пароперегреватели. Три пароперегревателя с различной мощностью: первый – 204 МВт, второй – 135 МВт и третий – 99 МВт реализуют ступенчатый перегрев пара до рабочей температуры 500 °С после каждого акта расширения в

турбине. Полное осушение пара поступающего из парогенератора происходит уже после первого перегрева.

## 4.2.2 Турбина

Паровая турбина. Выполняется по классической конструкции. Она имеет три рабочих цилиндра высокого, среднего и низкого давления и работает по циклу Ренкина. Высокая сухость пара на всех ступенях турбины позволяет повысить ее надежность и долговечность.

Правильность выбора параметров оборудования основных схемы подтверждается результатами расчета баланса энергий (таблица 10). Справочные данные для расчета и свойства материалов найдены в специализированной литературе [80]. Как видно из таблицы 10, наблюдается хорошее согласование параметров установки, таких как мощность, расход теплоносителя, температура теплоносителя и т.д. Был проведен оценочный расчет мощности турбины. При тепловой мощности реактора 1000 МВт мощность турбины с тремя ступенями составляет 471,9 МВт (таблица 12). Для сравнения характеристик турбины рассмотрены варианты с различным количеством ступеней – от двух до четырех (таблицы 11–13). Вариант тремя ступенями является наиболее с предпочтительным.

			Нагреватель (гелий)				Приемник тепловой энергии (пар- вода)				
		Температура, °С		W тепл,	G, кг/с	Температура, °С		W тепл,	G,		
		вход	выход			вход	выход	MBt	KI7C		
Подогрев	атель	182	170	150	2851	33	174	149			
Π		370	265	273	500	174	365,7	270			
Парогене	ратор	440	370	182		300	300	300	365,7	366,8	146
tep	1			212	233	366,8		197	231		
рог Эева	2	615	440	140	153	288,5	500	137			
Па егр	3			103	113	315,3		100			
Итого	<b>):</b>			1060				1003			

Таблица 10 – Энергетический баланс схемы

#### Таблица 11 – Параметры турбины с 2 ступенями

Ν		2 ступени						
	Р, МПа	T, C	і, кДж/кг	S, кДж/кг С	v, м3/кг	Х	МВт	%
Ι	20	500	3241,19	6,14	0,015	-	94,36	22%
	4,5	275,26	2865,26	6,14	0,047	-		
II	4,5	500	3440,17	7,03	0,076	-	325,34	78%
	0,005	33	2143,98	7,03	23,34	0,83		
	Мощность турбины, МВт						419,7	7

Ν			Мощность					
	Р, МПа	T, C	і, кДж/кг	S, кДж/кг С	v, м3/кг	Х	МВт	%
Ι	20	500	3241,19	6,14	0,015	-	88,65	19%
	5	288,5	2887,99	6,14	0,043	-		
II	5	500	3434,47	6,97	0,069	-	91,01	19%
	1,5	315,19	3071,89	6,97	0,17	-		
III	1,5	500	3473,56	7,57	0,24	-	292,28	62%
	0,005	33	2309,1	7,57	25,25	0,9		
			471,9	9				

### Таблица 12 – Параметры турбины с 3 ступенями

### Таблица 13 – Параметры турбины с 4 ступенями

N		4 ступени						
	Р, МПа	T, C	і, кДж/кг	S, кДж/кг С	v, м3/кг	Х	МВт	%
Ι	20	500	3241,19	6,14	0,015	-	47,70	10%
	10	385,46	3051,17	6,14	0,025	-		
II	10	500	3375,06	6,6	0,033	-	52,96	11%
	5	386,86	3164,05	6,6	0,056	-		
III	5	500	3434,47	6,98	0,068	-	91,01	19%
	1,5	315,19	3071,89	6,98	0,17	-		
IV	1,5	500	3473,56	7,57	0,24	-	292,28	60%
	0,005	32,87	2309,1	7,57	25,25	0,9		
			Мощность ту	урбины, МВт			483,9	9

T (	11 0				_			~
Габлица	14 - 0	павнение	энепт	ORLIN	NAOOTKU	Rani	UAHTOR	туроин
таолица	14 U	publicitie	Jucht	ODDI	Juoonkii	Dupi	nunitod	rypomi

Вариант	Кол-во	Мощность	Энерговыработка,	Стоимость э/энергии	Разница в прибыли*			
Бариант	ступеней	эл, кВт	кВтч/год	млрд тг/год	млрд тг/год	%		
1	4	483900	4,24E+09	46,63	6,186	115		
2	3	471900	4,13E+09	45,47	5,030	112		
3	2	419700	3,68E+09	40,44	0	100		
*Сравниваются показатели 1-го и 2-го варианта с показателями 3-го варианта. Цена за 1 кВт×ч принята равной 11 тенге. 1 год равен 365×24 = 8760 часов.								

Разработана схема передачи тепловой энергии от реактора в контур паровой турбины, реализована технология использования энергии замедления нейтронов и утечек тепла из каналов ТВС, обеспечен ступенчатый тройной перегрев пара до рабочих значений температуры, пар на всех ступенях турбины имеет высокую сухость и не вызывает интенсивной коррозии лопаточного узла, проведен расчет теплового баланса схемы, выбраны основные характеристики оборудования.

#### 4.3 Расчет характеристик теплообменного оборудования

#### 4.3.1 Теплофизический расчет теплообменников

Основной целью проведения теплофизического расчета является нахождение площади поверхности теплообмена трубного пучка. Исходя из приведенной выше схемы контуров передачи энергии, были заданы требуемые мощности всех теплообменников, а также граничные условия. Далее, пользуясь методиками, представленными во втором разделе настоящей диссертационной работы, по справочным данным [28-32] и с помощью разработанной программы HeatEx, был определен ряд теплофизических параметров, таких как: расход теплоносителя, скорость, критерии Рейнольдса и Нуссельта, коэффициенты теплоотдачи и теплопередачи, площадь теплообмена и прочие.

Расчетная скорость теплоносителя находится в допустимых пределах, обеспечивая интенсивный теплосъем и не вызывая при этом опасных вибраций в трубном пучке. Исходные данные и результаты теплофизического расчета представлены таблице 15.

		Значен	ние		
Параметр	Почаграротани	Пополонополог	Паро	оперегреват	ели
	подогреватель	парогенератор	1	2	3
	Исходн	ые данные			
Мощность, МВт	150	414	204	135	99
Греющий теплоноситель	Вода		Гелий		
Температура на входе, °С	182	440		615	
Температура на выходе, °С	170	265		440	
Нагреваемый теплоноситель	Вода	Вода	Водяной пар		
Температура на входе, °С	33	174	366,84	288,5	315,3
Температура на выходе, °С	174	366,84	500		
Давление в трубках, МПа	1,0	6,0		6,0	
Давление в кожухе, МПа	1,0	20,0	20,0	5,0	1,5
	Расчетн	ые данные			
Мощность расчетная, МВт	152,6	415,6	211,4	139,6	102,6
Расход теплоносителя общий, кг/с	2833	454,9	224	148,2	108,7
Скорость теплоносителя, м/с	2,83	50	49,2	49,8	49,9
Коэффициент теплопередачи, Вт/м <sup>2</sup> К	6242	5300	1569	1584	1565
Площадь теплообмена, м <sup>2</sup>	1354	490	550	361	268

Таблица 15 – Исходные данные и результаты теплового расчета

4.3.2 Расчет массово-габаритных характеристик

Масса оборудования и его размеры влияют на как процесс изготовления, транспортировки, так и на капитальные затраты. По этой причине необходимо следовать курсу на снижение веса оборудования и его размеров.

В рамках данного расчета получены следующие данные: количество трубок и их типоразмер, шаг треугольной решетки, масса трубного пучка и корпуса, оптимальная толщина стенки корпуса (таблица 16). Эти параметры напрямую влияют на ресурсоемкость конструкций. Выбор материала трубок является поисковой задачей. В качестве отправной точки выбрана нержавеющая сталь марки 12X18H10T [71,72]. Трубный пучок набирается из тонкостенных трубок, диаметр которых значительно меньше используемых на парогенераторах типа ПГВ [81,82].

	Значение						
Параметр	Подогревате	Параранаралар	Пароперегреватели				
	ль Парогенератор		1	2	3		
Материал трубки		Сталь 1	2X18H10T				
Кол-во трубок, шт	14562	15636	5010	3284	2439		
Размеры трубки, мм	Ø8×1,0×3000						
Шаг треугольной	10.5						
решетки, мм	10,5						
Масса трубок, кг	3641	3909	1252,2	821,2	609,9		
Материал кожуха		Сталь 1	2X18H10T				
Внутренний диаметр,	2 33	3 36	16	13	13		
М	2,33	5,50	1,0	1,5	1,5		
Толщина стенки, мм	100						
Масса кожуха, кг	30254	43093	31027	25327	22032		
Macca	33805	47002	32279.2	261/18 2	22641.0		
теплообменника, кг	55075	47002	52219,2	20140,2	22041,9		

Таблица 16 – Исходные данные и результаты конструкционного расчета

Полученные характеристики полностью удовлетворяют требованиям, предъявляемым к теплообменникам АЭС – обеспечивается заданная производительность, простота исполнения, малый вес конструкции (по сравнению с теплообменниками ВВЭР-1000), а, следовательно, и меньшие капитальные затраты.

4.3.3 Тепло-гидравлический анализ подогревателя методом конечных элементов

Проведен тепло-гидравлический расчет одного теплообменного аппарата предназначенной (подогревателя) программе, ДЛЯ тепло-В анализа гидравлических характеристик сложных систем [83,84]. Была разработана расчетная модель подогревателя мощностью 150 кВт [72]. Масштабное уменьшение мощности подогревателя обусловлено ограниченными вычислительными и временными ресурсами. Такой подход к решению задачи не достоверность результатов расчета. Прочие характеристики, влияет на

геометрические размеры и материальный состав полностью соответствуют реальному оборудованию.

Для выполнения расчета была построена трехмерная модель подогревателя, которая представлена на рисунке 19.





Далее, исходя из условий симметричности полученная геометрия была упрощена до четвертой части и разбита на конечные элементы, в результате получена сеточная модель подогревателя, которая показана на рисунке 20. Результаты расчета модели подогревателя приведены в таблице 17.



А) сеточная модель <sup>1</sup>/<sub>4</sub> части Б) сеточная структура одной трубки теплообменника

1 – греющий теплоноситель; 2 – труба 8×1 мм; 3 – нагреваемый теплоноситель; 4 – кожух теплообменника

Рисунок 20 – Четвертая часть сеточной модели теплообменника

	Значение			
Параметр	Греющий	Нагреваемый		
	теплоноситель	теплоноситель		
Мощность теплообменника, кВт	1.	50		
Вид теплоносителя	BC	ода		
Давление, МПа	1,1			
Расход, кг/с	2,83	0,24		
Т на входе, °С	182	33		
Т на выходе, °С	170	174		
Средняя скорость, м/с	2,	65		
Размеры теплообменных трубок, мм	Ø8×1,0	0×3000		
Масса теплообменных трубок, кг	19,24			
Количество теплообменных трубок, шт	ых трубок, шт 37			
Площадь теплообмена, м <sup>2</sup>	2	,8		

#### Таблица 17 – Результаты проверочного расчета

## 4.4 Сравнение основных параметров

## 4.4.1 Сравнение с ВВЭР

Проведено сравнение основных массово-габаритных показателей теплообменного оборудования исследуемого газоохлаждаемого реактора с типовым проектом реактора ВВЭР-1000, результаты которого показаны в таблице 18.

	DDOD	Газоохлаждаемый реактор с водным замедлителем						
Параметр	ввэр- 1000	Подогреватель	Парогенератор	Пароперегреватели				
	воды		1	2	3			
Мощность, МВт	4×800	152,6	415,6	211,4	139,6	102,6		
Давление, МПа	16,0	1	20		5	1,5		
Масса, т	4×264	34	46,5	33	25,5	23		
Сумм. масса, т	1 056		162					
	Уде	льная масса, (отн.е,	д.) отнесенная к					
тепловой мощности	1	0,49						
эл. мощности	1		0,33					

Таблица 18 – Сравнительные характеристики парогенераторов

Уменьшение габаритов теплообменников газоохлаждаемого реактора стало возможным за счет следующих факторов:

- использование гелия в качестве теплоносителя;

- отсутствие сепарационных узлов в парогенераторе;

- использование теплообменных трубок малого диаметра;

- полноценное заполнение объема кожуха теплообменными трубками.

На рисунке 21 схематически изображены парогенераторы, используемые на реакторе ВВЭР-1000 и теплообменные аппараты газоохлаждаемого реактора с

водным замедлителем. Для объективной оценки габаритов модели выполнены в одном масштабе.



Пароперегреватель 3

Рисунок 21 – Габаритные размеры теплообменного оборудования

В таблице 18 приведены значения массы парогенераторов реактора ВВЭР-1000 и теплообменников газоохлаждаемого реактора. Данные свидетельствуют о том, что при нормировке мощности реакторов, теплообменные аппараты газоохлаждаемого реактора имеют вдвое меньшую массу, чем парогенераторы, используемые на BBЭP-1000 [85].

Явное уменьшение габаритов парогенератора газоохлаждаемого реактора стало возможным за счет следующих факторов:

- отсутствие сепарационных узлов (окончательное осушение пара происходит в первом пароперегревателе);

- использование тонкостенных трубок (улучшает теплопередачу и обеспечивает достаточную прочность);

-заполнение всего объема кожуха трубными пучками (уменьшение диаметра кожуха, что напрямую влияет на его массу).

4.4.2 Сравнение с мировыми проектами ВТГР

По данным МАГАТЭ [86] на сегодняшний день в мире идет разработка четырех проектов АЭС на основе газоохлаждаемых реакторов. Проекты АЭС представлены разными странами, имеют разную мощность, и преследуют различные цели. Примечательно то, что во всех проектах теплоносителем является гелий, а замедлителем графит. Если выбор графита как замедлителя очевиден, то многочисленные недостатки гелия вызывают споры в отношении целесообразности его применения. Тем не менее, данные, приведенные в таблице 19 говорят о том, что на сегодняшний день гелий является лучшим газовым теплоносителем.

Характеристика	ГОР с ВЗ	GTHTR300C	HTR- PM	PBMR	Prismatic HTR		
Страна	РК	Япония	КНР	ЮАР	CIIIA		
Тепловая мощность, МВт	1000	600	500	400	350		
Теоретический КПД, %	46	45,6	42,2	41,2	42,9		
Спектр нейтронов		Тепловые нейтроны					
Теплоноситель		Гелий					
Замедлитель	Вода	Графит					
Расход теплоносителя ч/з реактор, кг/с	549	439	96	96	157,1		
Давление теплоносителя, МПа	6	7	7	6	6,39		
Температура теплоносителя в реакторе (вход/выход), °С	265 / 615	587 / 850	250 / 750	250 / 750	322 / 750		
Тип ТВЭЛ	стержнево й	сфер	призматический				
Вид топлива	UO <sub>2</sub> +Th	UO <sub>2</sub> +MOX	$UO_2$	UO <sub>2</sub>	UCO		

Таблица 19 – Сравнение проектов газоохлаждаемых реакторов

К недостаткам аналогичных зарубежных проектов можно отнести несколько факторов. Приведенные выше газоохлаждаемые реакторы относятся к высокотемпературным реакторам, работающим по циклу Брайтона или по неполному циклу Ренкина. Высокие температуры теплоносителя вынуждают отказаться от распространенных стержневых твэлов, что усложняет изготовление, эксплуатацию и переработку топлива. Малая мощность этих реакторов и, меньший более чем на 10 % по сравнению с предлагаемым реактором КПД, также показывают их неэффективность.

## 4.5 Выводы по разделу

Предложенная нами схема реактора и включения его элементов в цикл Ренкина обеспечивает получение термодинамического КПД на уровне 46 % при температуре теплоносителя 500 °C, максимальном давлении пара 20,0 МПа, использовании хорошо отработанных стержневых твэлов.

Показаны технические возможности достижения высокой сухости получаемого пара, что обеспечит снижение затрат на изготовление лопаток турбины, в первую очередь, за счет уменьшения необходимой толщины легированных материалов.

Турбина парового контура может быть построена с минимальным применением легированных материалов её лопаток, т.к. на выходе турбины достигается высокая сухость пара.

Доказано, что тепловыделяющая сборка рассматриваемого газоохлаждаемого реактора может быть построена по упрощенной схеме без теплового экрана. Это приведет к значительному снижению затрат на её создание, уменьшит затраты энергии на прокачку теплоносителя, снизит потерю нейтронов, габариты активной зоны.

Конструкция такой тепловыделяющей сборки позволяет передавать энергию продуктов деления на этапе расхолаживания в контур замедлителя без использования газового контура теплоносителя в течение двух суток после останова реактора.

## **5** ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ПАРООБРАЗОВАНИЯ И ПЕРЕГРЕВА ПАРА

В данном разделе представлены основные технические решения, которые легли в основу экспериментальной установки, моделирующей единый контур подогрева воды, парообразования и перегрева пара, который реализован в схеме АЭС на основе газоохлаждаемого реактора с водным замедлителем. Эти решения выработаны на основании проведенных расчетных исследований, основные результаты которых представлены в научных работах [72,85,87,88]. Для детальной проработки конструкции и режимов проведения испытаний были проведены испытания, включая серию пуско-наладочных работ по отработке режимов ее эксплуатации и отладке разработанной информационно-управляющей системы. Представлены результаты серии экспериментов.

### 5.1 К вопросу использования тонкостенных теплообменных трубок

Из наиболее значимых проблем, связанных с эксплуатацией теплообменных аппаратов, и парогенераторов в частности, можно выделить следующие: коррозия, эрозия, вибрационный износ, накопление нерастворимых отложений, разрыв теплообменных трубок. К вероятным причинам их возникновения можно отнести: нарушение водного режима, высокие скорости теплоносителя, высокая температура, неэффективность систем продувки и промывки и т.д.

Одним из путей модернизации теплообменного оборудования, и в частности парогенератора может быть использование тонкостенных теплообменных труб меньшего чем в ПГВ-1000 диаметра.

В работе [89] подробно изучены механизмы возникновения повреждений трубного пучка, несвоевременное выявление которых приводит к появлению трещин и разрыву трубопроводов. Отдельной главой обозначены проблемы вибрации в трубном пучке. Приведены расчетные формулы и методы регистрации акустических колебаний, вызванных неравномерностью потока теплоносителя, переменным напором, гидравлическими сопротивлениями и т.д. Показаны методики регистрации акустических возмущений и применяемое оборудование. Однако, не смотря на содержательность данной монографии, в данной работе не представлены исследования в условиях интенсивного парообразования и перегрева пара более чем на 100 °C, тем не менее результаты и методики различных исследований, описанных в монографии [89], будут полезны при планировании и проведении экспериментальных работ.

Использование тонкостенных теплообменных трубок влечет как увеличение тепловых характеристик теплообменников, так и потенциальные риски, связанные с меньшей прочностью, при высоких температурах. По результатам литературного обзора [90,91] принято решение выполнить исследование процесса парообразования и перегрева пара на экспериментальной установке. Как следует из вышеприведенной таблицы 17, предполагается использовать трубки размером Ø8×1×3000 мм, тем самым, максимально близко

имитировать конструкцию и режим работы тракта образования и перегрева пара, предложенного в схеме газоохлаждаемого реактора [92].

Уменьшение размера против размера трубок, используемых В парогенераторах реактора ВВЭР-1000 16×1,5 мм, приведет к снижению массы трубного пучка в 10 раз, а уменьшение толщины стенки к более эффективному теплообмену. При таком размере у ВВЭР отношение толщины стенки к диаметру составляет k = 0,09375. Известны парогенераторы с трубками, у которых значение этого параметра еще меньше, например, в некоторых японских парогенераторах k = 0.057, в немецких k = 0.056 [93]. В случае использования трубок  $Ø8 \times 1$  мм k = 0,125, что гораздо больше всех перечисленных ранее конструкций. Следовательно, прочностные характеристики трубки при уменьшении ее размеров не ухудшились.

Так же существенным преимуществом в пользу возможности применения таких трубок является низкое давление теплоносителя в схеме – не более 6 МПа против 15,7 – 16,4 МПа в парогенераторах ПГВ-1000 [94].

Однако остаются некоторые моменты, требующие экспериментального подтверждения. Первый – более высокая тепловая нагрузка:

– температура пара на выходе из парогенератора в газоохлаждаемом реакторе выше, чем в реакторах ВВЭР примерно на 80 °С;

– пар претерпевает дальнейший перегрев (в трех пароперегревателях) более чем на 100 °С после каждого.

Второй момент связан с ограниченностью теоретических методов исследования, которые требуют практической апробации.

особенность парогенератора Отличительная ГОР заключается В исключении сепаратора пара, так как в ходе дальнейшего перегрева, намного превышающего точку кипения, пар становится сухим. Вместе с тем, такой подход требует соответствующего обоснования. Связано это, в первую очередь, с особенностями присущими двухфазным потокам. Образующиеся в водной среде большие градиенты давления, плотности и температуры в ходе кипения непосредственно влияют на характеристики теплообмена, как в рабочих режимах, так и в аварийных ситуациях, требуют учета многих факторов [95]. Требуется проведение сложных расчетов, алгоритм которых должен быть экспериментальными данными. Должна быть обоснована подтвержден возможность отказа ОТ установки промежуточного сепаратора между парогенератором и пароперегревателем.

Следовательно, необходимо исследовать влияние различных процессов на параметры получаемого перегретого пара и отработать возможность реализации предложенной схемы в условиях, приближенных к реальной эксплуатации.

#### 5.2 Предпосылки к созданию установки

Парогенераторы одни из важнейших элементов АЭС, основным назначением которых является выработка пара, поступающего в турбину. В настоящее время на АЭС с ВВЭР применяют парогенераторы типа ПГВ-440 и ПГВ-1000 [96].
От эффективности параметров парогенератора напрямую зависит общий КПД станции. Поэтому при проектировании важно выбрать наиболее оптимальный вариант конструкции, который будет сочетать в себе лучшие тепло-гидравлические, конструкционные характеристики и экономические показатели.

Основным элементом парогенераторов является пучок теплообменных трубок, через поверхность которых происходит передача тепла от рабочего тела к воде для ее последующего парообразования.

В работе [94] сказано: "уменьшение толщины стенок теплообменных трубок с одной стороны ведет к повышению тепловой эффективности, а с другой – к снижению надежности и безопасности за счет увеличения вероятности разрыва", что неоднократно имело место на АЭС с PWR.

АЭС Преимуществом рассмотренной ранее схемы на основе газоохлаждаемого реактора с водным замедлителем и циклом Ренкина является наличие единого последовательного контура, в котором реализуется весь термодинамический цикл. Так вода после конденсатора подогревается в первом теплообменнике за счет использовании энергии замедления нейтронов, затем в парогенераторе происходит ее нагрев до температуры кипения и образование пара, который далее поступает в первый пароперегреватель, где его температура повышается до рабочей отметки 500 °C, а сухость приближается к единице. Перегретый пар затем расширяется на лопатках цилиндра высокого давления, после чего направляется на второй пароперегреватель, где его температура снова поднимается до необходимого уровня. После последней ступени турбины отработанный пар направляется в конденсатор, где сжижается.

Была предложена схема экспериментальной установки [97], в которой возможна реализация части описанных выше процессов с целью получения пара высокой температуры и сухости, соответствующие расчетным параметрам схемы газоохлаждаемого реактора с водным замедлителем [98]. Данная установка защищена патентом Республики Казахстан на полезную модель (Приложение А). Принципиальная схема установки представлена на рисунке 22.



 1 – баллон с сжатым азотом; 2 – емкость с водой; 3 – участок подогрева воды;
 4,6 – дроссельное устройство; 5 – контур парообразования и перегрева пара Рисунок 22 – Принципиальная схема установки [97]

Основной целью экспериментальных работ на установке является изучение процессов, происходящих в теплообменных трубках при интенсивном парообразовании с последующим перегревом пара относительно точки кипения на более чем 150 °C. В современных реакторах настолько интенсивного перегрева нет, поэтому данный вопрос остается не изученным. В рамках данного экспериментального исследования будут изучены теплофизические характеристики перегретого пара, в частности температура и сухость.

Рассмотрено два возможных варианта реализации процесса разогрева тракта образования и перегрева пара. В первом случае трубка нагревается за счет собственного электрического сопротивления непосредственным пропусканием электрического тока. Это реализуется путем ее подключения к понижающему достаточной мощности. Второй трансформатору вариант предполагает использование омического нагревательного элемента, который наматывается на ее поверхность. В качестве нагревателя может использоваться проволока диаметром порядка 1 мм выполненная из нихрома, фехрали или другого материала с высоким электрическим сопротивлением. Далее будут рассмотрены варианты конструкции установки, а также представлены результаты расчетов параметров установки с различным способом нагрева и в обоснование выбора оптимальной конструкции. Подробно требования к конструкции установки изложены в техническом задании на разработку проекта экспериментальной установки [99].

## 5.3 Установка с U-образным трактом

5.3.1 Конструкция установки

Основным элементом является тракт парообразования и перегрева пара, выполненный из стали марки 12X18H10T. Как следует из схемы, представленной на рисунке 15, парообразование в парогенераторе и перегрев пара в пароперегревателях осуществляется в едином контуре. Теплоноситель – гелий, переносит тепловую энергию из активной зоны реактора в пароперегреватели и парогенератор и, омывая пучок теплообменных трубок, отдает ее рабочему телу (воде в парогенераторе и пару в пароперегревателях). Аналогичная схема передачи тепловой энергии реализуется в разрабатываемой установке. Разница заключается в том, что в рамках эксперимента энергия горячего газа будет заменена на электрический источник.

Теплообменные трубки, применяемые в парогенераторе ПГВ-1000, имеют U-образную форму, что сокращает размеры кожуха парогенератора и упрощает организацию подвода теплоносителя. Принимая это техническое решение за прототип, разработана схема экспериментальной установки с U-образным трактом образования и перегрева пара, которая показана на рисунке 23.



1- баллон с азотом; 2 – редуктор; 3 – емкость с водой; 4 – нагреватель емкости;
 5 – теплоизоляция емкости; 6 –трубка контура парообразования и перегрева пара;
 7 – расход задающее устройство; 8 – трансформатор понижающий Рисунок 23 – Схема установки с непосредственным нагревом U-образного тракта образования и перегрева пара

Установка содержит различные компоненты, которые обеспечивают подобие схеме передачи тепла от реактора в контур парообразования и перегрева пара, применяемой в АЭС на основе газоохлаждаемого реактора с водным замедлителем. Рассмотрим их более подробно.

Емкость высокого давления. Емкость (рисунок 24) представляет собой сосуд цилиндрической формы, состоящий из обечайки (поз.4) Ø100×10 мм, приварного днища (поз. 7) и фланца (поз. 3). Крепление крышки (поз. 2) к фланцу – болтовое. В крышке выполнено два отверстия Ø8 мм, через которые в емкости размещаются два патрубка (поз. 1), необходимые для наполнения емкости и подачи подогретой воды в трубку. Расчетное давление в емкости 10 МПа, соответствует температуре кипения воды 311 °C.



1– патрубки; 2 – крышка; 3 – фланец; 4 – обечайка; 5 – нагреватель; 6 – теплоизоляция; 7 – днище. Рисунок 24 –Конструкция емкости высокого давления

Необходимо выполнить тепловой и конструкционный расчет параметров нагрева емкости. Определить время нагрева воды, рассчитать максимальную температуру поверхности теплоизоляционного слоя. Рассчитать параметры и выбрать электронагревательный элемент.

**U-образный тракт образования и перегрева пара.** Тракт представляет собой трубку Ø8×1 мм длиной 3000 мм, выполненную из нержавеющей стали марки 12X18H10T. Трубка располагается горизонтально и согнута таким образом, чтобы оба ее конца находились с одной стороны и в одной плоскости, что существенно облегчает подключение к источнику электропитания. Схема

подключения представлена на рисунке 25. В качестве источника питания может быть использован понижающий трансформатор достаточной мощности. Потери тепла в окружающую среду предполагается минимизировать с помощью минеральной теплоизоляции. Контроль температуры трубки осуществляется по средствам термоэлектрических преобразователей (термопар).



1 – тракт образования и перегрева пара; 2 – понижающий трансформатор; 3 – источник питания.

Рисунок 25 – Схема подключения U-образной трубки к источнику питания

Основные характеристики трубки приведены в таблице 20.

Параметр	Значение
Длина трубки, мм	3000
Материал	Сталь 12Х18Н10Т
Рабочее давление, МПа	10
Рабочая температура, °С	до 500
Теплоизоляция	Стеклоткань
Расположение трубки	Горизонтальное
Форма трубки	U-образная

Таблина	20 -	Xa	ракте	ристики	U-об	разной	трубки
таолица	20	110	parte		0 00	pasnon	ip, omi

Необходимо выполнить расчеты требуемой электрической мощности, определить тепловые нагрузки, время разогрева трубки до требуемой температуры. Также с учетом полученных результатов необходимо подобрать электрические комплектующие: трансформатор, кабели, клеммы и прочее.

**Информационно-управляющая система установки.** Управление установкой, а также контроль и регистрация измеряемых параметров осуществляется удаленно в режиме реального времени по средствам ПК со специализированным программным обеспечением.

5.3.2 Расчетное обоснование конструкции

Расчет емкости высоко давления. Для проведения расчетного обоснования конструкции емкости высокого давления необходимо выполнить два расчета. Первый расчет направлен на определение конструкционных характеристик емкости, ее надежности в условиях работы под большим

давлением с перегретой водой. Второй расчет – теплофизический, необходим для выбора нагревательного элемента, определения поля температур, потерь тепла через стенки, определения времени нагрева воды в емкости до заданных параметров.

Для решения сложной связанной задачи была построена трехмерная модель емкости, учитывающая все материально-размерные характеристики. Расчетная модель представлена на рисунке 26. Расчет выполнен в программном комплексе [100] в два этапа, на первом этапе были определены тепловые параметры, на втором – конструкционные.



1 – патрубок подачи воды; 2 – патрубок подачи газа; 3 – крышка емкости; 4 – болты крепления крышки; 5 – емкость; 6 – вода; 7 – нагреватель; 8 – минеральная теплоизоляция

Рисунок 26 – Расчетная 3-х мерная модель емкости высокого давления

По результатам теплового расчета получено распределение температуры по элементам емкости. Найдено время разогрева воды до требуемого значения температуры. Выбран тип и параметры электронагревательного элемента и теплоизоляции. Результаты расчета представлены в таблице 21.

Параметр	Значение
Объем емкости, л	2,1
Объем воды, л	2,0
Рабочее давление емкости, МПа	0,8
Материал емкости	Сталь 12Х18Н10Т
Тип нагревателя	КТМС-НХ, Ø3 мм
Напряжение питания, В	До 220
Мощность нагревателя номинальная, Вт	8000
Тип теплоизоляции	Supersil
Толщина теплоизоляции, мм	20

С учетом полученных тепловых нагрузок на элементы емкости проведен прочностной расчет толщины стенок обечайки и плоского днища на рабочие параметры (Рраб = 11 МПа, Т стенки = 400 °C). Расчет выполнен по стандартам [101,102], в которых приводится методика расчета и допускаемые напряжения. Так для стали 12X18H10T допускаемое напряжение при T=500 °C составляет 105 МПа.

Выполнено моделирование нагрузок, возникающих под действием внутреннего давления. Создана трехмерная расчетная модель емкости, которая материальным характеристикам соответствует по геометрическим И разрабатываемой конструкции. В качестве нагрузки задано давление 11 МПа на поверхности емкости. Найдено значение внутренние максимального напряжения, распределение напряжений по корпусу емкости, просчитана деформация емкости. Результат моделирования представлен на рисунке 27.



слева – напряжение, Па; справа – деформация, мм Рисунок 27 – Результаты конструкционного расчета емкости

Наибольшие напряжения, до 90 МПа находятся в пределах допускаемого значения и возникают в кольцевом зазоре, образованном соединением крышки с фланцем. Нагрузка на боковую поверхность емкости также не превышает допускаемое напряжение и находится в пределах от 40 до 60 МПа. Наименее напряженные участки – днище и крышка. Здесь значение напряжения находится в пределах от 7 до 22 МПа.

Линейная деформация емкости под действием внутреннего давления не превышает значения 0,016 мм.

По результатам проведенного конструкционного расчета и моделирования можно сделать вывод о том, что приведенная конструкция емкости способна выдержать рабочее давление и температуру, при этом коэффициент запаса равен 2,39.

Расчет тракта образования и перегрева пара. В рамках расчетного обоснования конструкции U-образного тракта образования и перегрева пара необходимо определить параметры электрического нагрева трубки и тепловые характеристики.

Проведен расчет электротехнических параметров непосредственного нагрева трубки электрическим током. Найдены значения напряжения и силы тока, требуемых для нагрева. Оценено время, за которое трубка прогреется до рабочей температуры. Результаты расчета приведены в таблице 22.

Таблица	22 -	Резу	льтаты	расчета	парам	истров	нагі	рева	τηνδκι	Т
таолица		T CJ	JIDIUIDI	pue le lu	mapan	101pob	mar	JUDU	1 p y OK	

Параметр	Значение
Диаметр наружный, мм	8
Диаметр внутренний, мм	6
Длина трубки, мм	3000
Масса трубки, г	516
Удельное сопротивление стали 12Х18Н10Т при Т=500 °С, Ом×м	1,03×10 <sup>-6</sup>
Сопротивление трубки при Т=500 °С, Ом	0,142
Мощность требуемая, кВт	11,6
Напряжение на клеммах, В	39,4
Ток, А	277,6
Время разогрева трубки до T=500 °C, с	~ 16

Основное преимущество такого способа нагрева трубки заключается в скорости нагрева и равномерности распределения тепла по всей поверхности трубки. Температура на поверхности трубки находится в диапазоне 509 – 511 °C по всей длине. Температурные градиенты появляются только в местах сгиба трубки, здесь температура ниже и составляет порядка 490 – 511 °C.

Однако данный способ нагрева имеет существенный недостаток, который заключается в сложности его реализации в лабораторных условиях. Так реальное электрическое сопротивление тракта чрезвычайно мало и сопоставимо с сопротивлением соединительных кабелей, которыми осуществляется подключение к трансформатору. Также вероятно возникновение локального перегрева (прожига) трубки в местах установки клемм. Еще один недостаток – потенциальная опасность проведения работ с током такой величины в условиях присутствия воды и водяного пара.

По этим причинам принято решение отказаться от данного способа нагрева трубки в пользу обычного нагревательного кабеля, а также от U-образной конфигурации, в силу сложности равномерной намотки нагревателя в местах сгиба трубки.

# 5.4 Установка с прямым трактом

5.4.1 Конструкция установки

Основным отличием модернизированной схемы установки является: использование для нагрева трубки внешнего проволочного нагревателя вместо нагрева прямым пропусканием тока. Для этого на наружной поверхности трубки,

под слоем проволочного нагревателя, установлена высокотемпературная электроизоляция из стеклоткани. Для снижения потерь тепловой энергии на наружной поверхности нагревателя установлена теплоизоляция также из стеклоткани.

Данная схема установки была обоснована многочисленными расчетами, результаты которых приведены в [73,74]. После окончательного выбора конструкции было принято решение [82] о модернизации и проведении экспериментов на установке, представленной на рисунке 28. Основные характеристики установки приведены в таблице 23, а перечень оборудования установки в таблице 24.



1 – емкость с водой; 2 – нагреватель емкости; 3 – теплоизоляция емкости; 4 – трубка Ø8×1; 5 – нагреватель трубки; 6 – теплоизоляция трубки; 7 – стапель; 8, 9 – расход задающее устройство

Рисунок 28 – Схема установки с внешним нагревателем тракта

Простота согласования такого нагревателя с питающим трансформатором позволила сократить длину пароперегревателя.

В методических экспериментах было принято решение снизить температуру подогрева воды в емкости до ~150 °С и, соответственно, рабочее давление в этой емкости до 0,5 МПа.



1,6– штуцеры с термопарами; 2 – трубка Ø8×1 мм; 3 – электроизоляция; 4 – нагреватель нихромовый; 5 – теплоизоляция минеральная Рисунок 29 – Тракт парообразования и перегрева пара

Параметр	Значение					
Основные параметры	Основные параметры					
Расход воды через трубку, г/с	13,47					
Время активного режима эксперимента, с	300					
Масса воды в емкости, кг (двукратный запас)	8					
Параметры трубки						
Ø×толщина стенки × длина, мм	Ø8×1×3000					
Материал	Сталь 12Х18Н10Т					
Рабочее давление, МПа	10					
Рабочая температура, °С	до 550					
Мощность нагревателя, кВт	4-5					
Параметры емкости						
Рабочее давление, МПа	10					
Рабочая температура, °С	310					
Объем емкости, л	10					
Мощность нагревателя, кВт	3-5					
Толщина теплоизоляции, мм	100					

Таблица 23 – Параметры экспериментальной установки

Прямой тракт парообразования и перегрева пара представлен на рисунке 29 и выполнен в виде трубки размерами  $\emptyset 8 \times 1 \times 1000$  мм из стали марки 12X18H10T. Нихромовый нагреватель из проволоки  $\emptyset 1,7$  мм установлен на участке длиной 900 мм. Номинальная мощность нагревателя ~11 кВт. Планируемая температура разогрева трубки 500 °C. Трубка установлена на неподвижном основании со скользящей посадкой, обеспечивающей возможность исследования вероятных вынужденных колебаний во время процесса движения пароводяной смеси в трубке.

№ Наименование Ед. изм Количество 1 Труба 8×1 мм 3 М 2 Емкость, V=1,2 л 1 ШТ. Баллон с азотом, V=40 л, P ~150 атм. 3 1 ШТ. Редуктор азотный 1 5 ШТ. Вентиль азотный 6 1 шт. 7 Устройство дроссельное, d=0,645 мм 1 шт. 9 Теплоизоляция «Supersil», толщина 10 мм  $M^2$ 1 10 Манометр емкости (10 МПа) шт. 1 Термопара, ТХА 3 11 шт. Датчик вибрации (Вибротест МГ-4) 12 1 ШТ. Вентиль подачи воды (10 МПа) 13 1 шт. 14 Клапан сброса давления (10МПа) 1 шт. Нагреватель емкости КТНМС-НХ 15 1 шт. Нагреватель тракта нихромовый 16 шт. 1

Таблица 24 – Перечень оборудования модернизированной установки

5.4.2 Расчетное обоснование конструкции установки и режимов ее работы

Расчет режимов работы тракта образования и перегрева пара выполняется с целью определения возможности достижения заданных параметров элементами установки, а также для определения зон кипения и перегрева пара.

Определение зон подогрева, парообразования и перегрева пара. Проведено компьютерное моделирование работы установки в условиях парообразования (фазовый переход).

Для этого построена расчетная модель тракта парообразования и перегрева пара, наложена расчетная сетка, заданы граничные условия и нагрузки (рисунок 30). Модель в полной мере повторяет геометрию и материальный состав реальной теплообменной трубки, в которой выделены две расчетные зоны: зона «Fluid» (вода, переходящая в пар) и зона «Solid» (стальная трубка). Для обеспечения необходимой точности расчета и качества моделирования была разделена на 60000 сеточная структура элементарных ячеек. Ортогональное качество сетки, рассчитанное программой на этапе ee построения, составило 98,5 %.



1 – зона «Fluid»; 2 – зона «Solid»; 3 – элементарная ячейка

Рисунок 30 – Фрагмент расчетной сетки модели теплообменной трубки

На входе в расчетную область поступает вода, которая под действием передаваемого от нагревателя через стенку трубки теплового потока, начинает закипать и превращается в водяной пар, который продолжает получать тепло и перегревается до требуемой температуры.

Основная цель данного моделирования заключается в том, чтобы оценить необходимую минимальную длину тракта, достаточную для осуществления процессов парообразования и перегрева пара. При этом необходимо подобрать правильное значение расхода питательной воды и ее скорость, а также определить мощность потребную для реализации данных процессов.

В результате моделирования найдены скорости теплоносителя, температура, объемная доля пара на выходе из трубки и другие параметры.

Основные результаты приведены в таблице 25. Визуальное отображение основных параметров представлено на рисунке 31.

	Тем	Температура трубки, °С			
Параметр / Значение	500	550	600		
Длина трубки, мм		3000			
Расход питательной воды, г/с		1,0			
Скорость пароводяной смеси, м/с					
-на входе	0,05	0,05	0,05		
-на выходе	1,3	1,7	2,0		
Температура воды, °С					
на входе	310	310	310		
на выходе	505,7	556,5	607,5		
Объемная доля пара на выходе, %	82	87	94		

Таблица 25 – Результаты теплофизического моделирования

Результаты данного теплофизического расчета необходимы для разработки правильной конструкции установки, выявления всех ее параметров, а также для прогнозирования режимов работы установки в зависимости от параметров теплоносителя.



Рисунок 31 – Визуальное представление результатов моделирования

Рассчитано предполагаемое распределение зон в тракте парообразования и перегрева пара. На рисунке 32 показано то, что кипение воды начнется на первом участке трубки длиной не более 0,5 м. Большую часть тракта занимает зона испарения, пройдя которую вся вода полностью испарится. Далее пар на последнем участке тракта длиной 0,3 м начнет перегреваться. На графике также видно отличие в темпе испарения воды в зависимости от ее удаленности от боковой поверхности трубки. Очевидно то, что вода, находящаяся ближе к нагреваемой стенке, испарится сразу. Данная радиальная неравномерность испарения воды может служить причиной возникновения шума и вибрации тракта.



Рисунок 32 – Распределение зон подогрева, парообразования и перегрева пара

Расчет диаметра расход задающего устройства. Данный расчет необходим для обеспечения точного расхода теплоносителя через отверстие расход задающей шайбы и выполнен данным [103]. От правильности значения расхода в первую очередь зависит потребление мощности. Расчет выполняется по известным формулам, которые приведены ниже.

В случае истечения перегретого пара через диафрагму или сопло массовый расход его вычисляется по формуле:

$$G = \varphi \cdot \mathbf{F} \cdot \mathbf{N} \frac{P_1}{\sqrt{\mathbf{R} \cdot \mathbf{T}}}$$
(5.1)

где N – коэффициент, учитывающий свойства газа;

ф – коэффициента расхода сопла;

F – площадь выходного сечения сужающего устройства, м<sup>2</sup>;

*P*<sub>1</sub> – давление газа во входном сечении сопла, Па;

T – температура газа, K;

R – газовая постоянная, Дж/(кг×К).

Коэффициент N, учитывающий свойства газа, определяется по следующей формуле:

$$N = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{1}{k-1}} \sqrt{\frac{2k}{k+1}}$$
(5.2)

где *k* – показатель адиабаты, равный 1,35 для перегретого пара

85

Формула для вычисления коэффициента расхода сопла:

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt{1 - m^2}} \cdot \left[ 0.99 + 0.2262 \cdot m^{2.05} \right] + \left[ (0.000215 + 0.001125 \cdot m^{0.5} + 0.00249 \cdot m^{2.35}) \cdot \left( \frac{10^6}{Re} \right)^{1.15} \right]$$
(5.3)

$$m = \left(\frac{d}{D}\right)^2 \tag{5.4}$$

где m – относительная площадь сужающего устройства, м<sup>2</sup>;

*d* – диаметр проходного сечения сужающего устройства, м;

*D* – диаметр трубопровода, м.

Число Рейнольдса вычисляется с помощью уравнения:

$$Re = \frac{G \cdot D}{F \cdot \mu} \tag{5.5}$$

где µ – динамическая вязкость газа, Па · с.

Массовый расход жидкости при истечении ее через сужающее устройство определяется по формуле:

$$G = \varphi \cdot \varepsilon \cdot F \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta P \cdot \rho} \tag{5.6}$$

В соответствие с приведенной выше методикой выполнен расчет диаметров проходного сечения сопла. Результаты расчета приведены в таблице 26.

Для требуемого в эксперименте расхода пара 5,77 г/с получаем диаметр выходного отверстия расход задающей шайбы ~ 0,81 мм. При этом мощность, требуемая на парообразование и перегрев пара будет равна ~11 кВт.

Таблица 20 – Блияние диаметра сопла на расход пара и мощноств						
Диаметр отверстия, мм	Расход пара, г/с	Требуемая мощность, Вт				
1,0	8,8	16671				
0,91	7,29	13810				
0,81	5,77	10931				
0,71	4,43	8392				
0,61	3,28	6213				

Таблица 26 – Влияние диаметра сопла на расход пара и мощность

Расчет собственных частот колебаний тракта образования и перегрева пара. Как известно из литературных источников, во время работы теплообменного оборудования в определенных режимах в его элементах возникает вибрация. Небольшая амплитуда и малая частота вибрационных волн не представляют угрозы для трубопроводов, только при условии несовпадения этих вынужденных частот с собственными частотами колебания трубок.

По литературным данным [104,105] частота вынужденных колебаний теплообменных трубок парогенератора находится в диапазоне 0–400 Гц. Следовательно, теплообменная трубка должна быть закреплена таким образом, чтобы это значение не совпало с собственной частотой колебаний. Было предложено восемь вариантов закрепления, описание которых представлено в таблице 27. На рисунке 33 схематически показано взаимное расположение точек закрепления.

Номер варианта	Количество точек по типам		Количество	Длина каждого
	крепления		пролетов	пролета, мм
	Жестко	С	между точками	
	закреплённые	возможностью	закрепления	
		скольжения		
1	2	1	2	1500
2	2	2	3	1000
3	2	3	4	750
4	2	4	5	600
5	3	0	2	1500
6	4	0	3	1000
7	5	0	4	750
8	6	0	5	600

Таблица 27 – Расчетные варианты

Для исключения вероятности совпадения частоты вынужденных и собственных колебаний необходимо выполнить две задачи. Первая заключается в определении собственных частот колебания тракта образования и перегрева пара, вторая – в измерении возникающих вынужденных частот колебаний в различных режимах работы установки и оптимизации способов закрепления.



Рисунок 33 – Расположение точек закрепления модели и их количество

Решение первой задачи выполнено методами компьютерного моделирования с помощью программы Ansys Workbench [106,107]. Рассмотрены различные варианты закрепления тракта парообразования и перегрева пара, количеством точек закрепления и способом фиксации: отличающиеся неподвижное закрепление и закрепление с возможностью скольжения. При этом крайние точки имеют жесткое анкерное крепление. Длина пролетов между точками крепления выбрано пропорционально количеству точек, следовательно, оно одинаково в переделах одного варианта. Для каждого варианта определены частоты собственных колебаний, которые представлены в таблицах 28-35.

$\langle 1 \rangle$						
3 точки закрепления, подвижное крепление						
N⁰	Частотный (Рад/сек)	Частотный (Герц)	Период (Секунды)			
1	260,62	41,479	0,024109			
2	260,66	41,485	0,024105			
3	262,67	41,805	0,023921			
4	262,71	41,812	0,023916			
5	569,45	90,632	0,011034			
6	569,55	90,647	0,011032			
7	574,57	91,446	0,010935			
8	574,7	91,467	0,010933			
9	958,31	152,52	0,0065565			
10	958,49	152,55	0,0065553			

Таблица 28 – Результаты расчета собственных частот колебания трубки (вариант 1)

$\langle 1 \rangle$						
4 точки закрепления, подвижное крепление						
N⁰	Частотный (Рад/сек)	Частотный (Герц)	Период (Секунды)			
1	506,83	80,665	0,012397			
2	506,96	80,686	0,012394			
3	507,61	80,789	0,012378			
4	507,81	80,82	0,012373			
5	517,26	82,325	0,012147			
6	517,42	82,349	0,012143			
7	1142,2	181,78	0,0055012			
8	1142,5	181,83	0,0054997			
9	1166,2	185,61	0,0053877			
10	1166,6	185,67	0,0053858			

Таблица 29 – Результаты расчета собственных частот колебания трубки (вариант 2)

Таблица 30 – Результаты расчета собственных частот колебания трубки (вариант 3)

5 точек закрепления, подвижное крепление				
N⁰	Частотный (Рад/сек)	Частотный (Герц)	Период (Секунды)	
1	832,68	132,53	0,0075457	
2	833,14	132,6	0,0075416	
3	833,67	132,68	0,0075368	
4	833,98	132,73	0,007534	
5	835,06	132,9	0,0075243	
6	835,42	132,96	0,0075209	
7	851,36	135,5	0,0073802	
8	1916,8	305,08	0,0032779	
9	1919,4	305,48	0,0032736	
10	1920,2	305,61	0,0032722	

Таблица 31 – Результаты расчета собственных частот колебания трубки (вариант 4)

6 точек закрепления, подвижное крепление					
N⁰	Частотный (Рад/сек)	Частотный (Герц)	Период (Секунды)		
1	1224,2	194,85	0,0051323		
2	1224,6	194,9	0,0051309		
3	1224,6	194,91	0,0051307		
4	1225	194,96	0,0051292		
5	1225,2	194,99	0,0051284		
6	1225,3	195,01	0,0051278		
7	1225,3	195,02	0,0051278		
8	1225,9	195,12	0,0051252		
9	1263,8	201,14	0,0049716		
10	1264,5	201,25	0,0049689		

$\langle \mathbf{I} \rangle$					
3 точки закрепления, неподвижное крепление					
N⁰	Частотный (Рад/сек)	Частотный (Герц)	Период (Секунды)		
1	129,59	20,624	0,048487		
2	129,63	20,631	0,048471		
3	131,29	20,895	0,047858		
4	131,34	20,903	0,04784		
5	357,01	56,819	0,0176		
6	357,13	56,839	0,017594		
7	361,78	57,579	0,017367		
8	361,88	57,596	0,017362		
9	699,46	111,32	0,0089829		
10	699,75	111,37	0,0089792		

Таблица 32 – Результаты расчета собственных частот колебания трубки (вариант 5)

	Таблица	33 –	Результать	г расчета	собственных	частот	колебания	трубки
(	(вариант	c 6)						

4 точки закрепления, неподвижное крепление				
N⁰	Частотный(Рад/сек)	Частотный(Герц)	Период(Секунды)	
1	292,67	46,58	0,021468	
2	292,68	46,581	0,021468	
3	292,69	46,583	0,021467	
4	292,72	46,587	0,021465	
5	299,19	47,618	0,021	
6	299,32	47,639	0,020991	
7	806,03	128,28	0,0077953	
8	806,09	128,29	0,0077947	
9	807,55	128,53	0,0077805	
10	824,04	131,15	0,0076249	

Таблица 34 – Результаты расчета собственных частот колебания трубки (вариант 7)

5 точек закрепления, неподвижное крепление				
N⁰	Частотный (Рад/сек)	Частотный (Герц)	Период (Секунды)	
1	524,11	83,415	0,011988	
2	524,34	83,451	0,011983	
3	524,36	83,455	0,011982	
4	524,43	83,466	0,011981	
5	524,53	83,481	0,011979	
6	524,63	83,497	0,011976	
7	537,51	85,547	0,01169	
8	537,62	85,565	0,011687	
9	1442,9	229,64	0,0043546	
10	1442,9	229,65	0,0043545	

(Daphani 0)					
6 точек закрепления, неподвижное крепление					
N⁰	Частотный (Рад/сек)	Частотный (Герц)	Период (Секунды)		
1	822,2	130,86	0,0076419		
2	822,28	130,87	0,0076412		
3	822,28	130,87	0,0076411		
4	822,29	130,87	0,007641		
5	822,31	130,87	0,0076409		
6	822,32	130,88	0,0076408		
7	822,34	130,88	0,0076406		
8	822,41	130,89	0,00764		
9	852,3	135,65	0,0073721		
10	852,53	135,68	0,0073701		

Таблица 35 – Результаты расчета собственных частот колебания трубки (вариант 8)

Из результатов расчета можно сделать следующие выводы:

 увеличение количества точек крепления приводит к возрастанию значений собственной частоты;

– полностью жесткое закрепление всех точек приводит к снижению значений собственной частоты колебаний;

– наиболее благоприятные условия закрепления могут быть достигнуты при наличии пяти и более точек крепления (длина пролета менее одного метра), при этом промежуточные точки не должны быть жестко закреплены.

Для решения второй задачи используется специальное оборудование – виброметр [108], который позволяет оперативно измерять частоту вынужденных колебаний любого оборудования. На рисунке 33 показан внешний вид данного прибора. Чувствительный элемент – пьезодатчик оснащен магнитным креплением, которое обеспечивает надежную фиксацию на измеряемом оборудовании. Прибор имеет жидкокристаллический дисплей, на который оперативно выводятся измеренные величины. Также имеется возможность его подключения к персональному компьютеру для дальнейшей обработки результатов измерений.



1 – корпус прибора; 2 – кабель подключения датчика; 3 – ЖК-дисплей; 4 – датчик с магнитным основанием; 5 – панель управления Рисунок 33 – Виброметр «Вибротест-МГ4»

Полученные данные будут использованы во время проведения пусконаладочных работ на установке. В зависимости от способа крепления тракта образования и перегрева пара и количества точек закрепления с помощью виброметра и расчетных данных будет выбрано наиболее безопасное и надежное крепление, при котором будет исключено возникновение резонансных вибраций.

# 5.5 Проведение пуско-наладочных работ

Перед проведением полномасштабных экспериментов необходимо убедится в работоспособности отдельных узлов установки в реальных режимах. Для этого проводится серия пуско-наладочных работ.

Общий вид собранной установки представлен на рисунке 34. В ходе подготовки экспериментов на установке была проверена герметичность емкости путем подачи азота с давлением 0,5 МПа, проверена работоспособность информационно-управляющей системы (ИУС), нагревателей и электромагнитного клапана.





1 – емкость с водой, 2 – манометр, 3 – вентиль, 4 –штуцер термопарный; 5 – контур парообразования и перегрева пара; 6 – нагреватель; 7 – электроизоляция; 8 – теплоизоляция; 9 – термопары; 10 – стапель Рисунок 34 – Общий вид экспериментальной установки

Были сформулированы задачи экспериментов первого этапа:

– определение времени разогрева трубки до рабочей температуры (500 °C) с помощью нихромового нагревателя в ходе ступенчатого изменения его мощности;

– подтверждение работоспособности нихромового нагревателя, электро- и теплоизоляции трубки в процессе длительного отжига;

 – определение времени разогрева воды в емкости 1 до температуры кипения при атмосферном давлении при работе нагревателя емкости на номинальной мощности;

При отработке режимов разогрева контура парообразования и перегрева пара спай термопары Т1 был расположен в зоне нагревателя, а Т2 – вне зоны (рисунок 35).



1 – трубка; 2 – нагреватель; Т1, Т2 – термопары Рисунок 35– Схема расположения спаев термопар и нагревателя

В ходе эксперимента реализован трехступенчатый рост мощности нагревателя – 450, 890 и 1800 Вт с продолжительностью каждого этапа 320 – 400 с. Регулировка мощности нагревателя осуществлялась с помощью автотрансформатора РНО-250. Результаты эксперимента представлены на рисунке 36.



Рисунок 36 – Показания термопар Т1 и Т2 в ходе разогрева трубки

В ходе разогрева емкости проводилось измерение давления с помощью манометра, установленного на втором патрубке емкости (рисунок 37). Результаты данного эксперимента представлены на рисунке 38.



Рисунок 37 – Оснащение емкости для ПНР



Максимальная температура пара к моменту окончания нагрева емкости составила ~130 °C при задержке около 30 с за счет теплоемкости корпуса емкости. При этом температура днища при остывании была на 15 – 20 °C больше температуры пара в течение нескольких минут.

Система управления и контроля параметров. Для регистрации показаний средств измерений и управления работой нагревателя и электромагнитного информационно-управляющая используется система клапана (ИУС), разработанная на основе SCADA системы Trace Mode 6 [109]. На мониторе в режиме реального времени (рисунок 39) отображаются показания термопар (Т01, T02, T03). Также представлена мнемоническая полностью схема, соответствующая разработанной установки.



Рисунок 39 – Главный экран ИУС

# 5.6 Процедура выполнения работ на установке

Работа на установке была разделена нами Ha на три этапа. подготовительном этапе герметичная емкость заполняется водой в количестве одного литра. С помощью баллона с азотом в емкости создается рабочее давление 10 МПа. Нагрев воды до температуры 300 – 310 °C осуществляется омическим нагревателем мощностью 3 кВт. Непосредственным пропусканием электрического тока через макет теплообменной трубки осуществляется ее разогрев до температуры 500 °C. С целью синхронизации времени прогрева емкости и трубки разогрев трубки начинается за 10 с до окончания нагрева емкости. Мощность, требуемая на парообразование и перегрев пара – 11,6 кВт.

Второй этап – активный режим, начинается открытием электромагнитного клапана. Вода с температурой близкой к температуре кипения при данном давлении подается в предварительно разогретую трубку, где начинается процесс парообразования. При этом подводимая к трубке мощность сохраняется на прежнем уровне. По мере движения пара по трубке, происходит перегрев пара до заданных параметров. Постоянный расход воды и пара через трубку (5,77 г/с) обеспечивает расход задающее устройство. Время активного режима эксперимента около 200 с.

Третий этап работы установки – расхолаживание. Цель данного этапа снизить температуру емкости и трубки до условно безопасного значения.

Расхолаживание выполняется непрерывной подачей водопроводной воды в емкость и трубку и занимает около 10 мин. Подробно этапы работы на установке и режимы работы оборудования описаны в таблице 36 [85].

Этап	Характеристик	Работа запорно-регулирующей	Контролируемые
Jian	И	арматуры и нагревателей	параметры
Наполнение емкости водой	V <sub>воды</sub> =1,2 л	0 с – Исходное состояние (ИС): Вентили В1 и В2 закрыты, Клапаны К1 и К2 закрыты, Нагреватель емкости и трансформатор отключены 1 с– Открыть В2 60 с – Закрыть В2	Объем воды в емкости
Создание рабочего давления в емкости	Р <sub>раб</sub> =10 МПа	60 с – ИС: В1, В2, К1, К2 закрыты, Нагреватель емкости и трансформатор отключены 61 с – Открыть В1 и К1 70 с – Закрыть К1 и В1	Давление в емкости (М1)
Разогрев воды в емкости	Р=10 МПа, T <sub>1</sub> =20 °С, T <sub>2</sub> =305 °С	<ul> <li>70 с – ИС: В1, В2, К1, К2 закрыты, Нагреватель емкости и трансформатор отключены</li> <li>70 с – Включить нагреватель</li> <li>1270 с – Отключить нагреватель</li> </ul>	Температура стенки емкости (Т4) Давление в емкости (М1)
Разогрев трубки	Р=10 Мпа, T <sub>1</sub> =20 °С, T <sub>2</sub> =500 °С	1260 с – Включить трансформатор	Температура трубки (Т2, Т3). Ток через трубку.
Рабочий режим установки	Подача перегретой воды в трубку G=5,77 г/с, T=305°С, P=10 МПа Парообразован ие T=311°С, P=10 МПа Перегрев пара T <sub>1</sub> =311 °С, T <sub>2</sub> =500 °С, P=10 МПа Сброс перегретого пара T <sub>1</sub> =500 °С, P=0,1 МПа	1270 с – ИС: Трансформатор включен, нагреватель емкости отключен, В1, В2, К1, К2 закрыты 1271 с – Открыть К2 1390 с – Отключить трансформатор	Температура трубки (Т2, Т3). Частота вынужденных колебаний трубки (dB). Температура перегретого пара на выходе (Т4)
Расхолаживание установки до условно- безопасного состояния	T=20 °C, P=0,1 МПа	1390 с – ИС: Трансформатор и нагреватель емкости отключены, B1, B2, К1 закрыты, К2 открыт 1392 с – Открыть B2 1992 с – Закрыть B2, К2	Температура стенки емкости (T1) Температура трубки (T2, T3)

# Таблица 36 – Этапы и режимы работы установки

## 5.7 Результаты экспериментов

Было проведено три эксперимента с парообразованием и перегревом пара на экспериментальной установке с различной компоновкой оборудования. Результаты представлены на рисунках 40 – 42. В ходе этих экспериментов осуществлялась непрерывная подача воды в емкость с дальнейшим ее перемещением в тракт парообразования и перегрева. Изменялись мощности нагрева емкости и теплообменной трубки. Начальный расход воды составил 3,2 г/с. В ходе экспериментов он менялся за счет роста сопротивления движению разогревающегося пара выходной шайбой.

По результатам экспериментальных работ были определены следующие параметры:

– зоны подогрева воды до температуры кипения, парообразования и перегрева пара;

– соотношение долей воды и водяного пара на выходе из трубки;

– характеристики перегретого пара при различных значениях расхода питательной воды;

– частоты вынужденных колебаний трубки на разных участках;

– характер кипения воды на различных участках трубки (пузырьковый, пленочный).

В первом эксперименте (рисунок 40) был выбран быстрый темп разогрева емкости с водой и тракта парообразования. Такой подход привел к тому, что в системе начался стремительный рост давления, который не позволил разогреть воду в емкости до требуемой температуры. При достижении избыточным давлением критической отметки 0,5 МПа было принято решение отключить нагреватели и организовать сброс давления в емкости до безопасного уровня, открытием электромагнитного клапана. Таким образом на диаграмме первого эксперимента виден быстрый рост давления в системе (синяя линия) и значительный недогрев тракта парообразования, который ограничил температуру перегретого пара на уровне ~420 °C.



Рисунок 40 – Результаты эксперимента № 1

По результатам первого эксперимента было подтверждено рассчитанное ранее расположение зоны подогрева воды до кипения, зоны парообразования и зоны перегрева пара. Для этого в тракт образования и перегрева пара со стороны выходного открытого конца помещался щуп с индикаторной бумагой на определенное расстояние, а затем извлекался. По состоянию индикаторной бумаги выявлялось наличие жидкой фазы. Оценочные данные говорят о том, что зона перегрева пара, в которой содержится только сухой перегретый пар находится на расстоянии порядка 100 мм от выходного конца.

Во втором эксперименте (рисунок 41) были учтены недочеты в режиме работы нагревателей установки. Мощность нагревателей была установлена на постоянный уровень, при котором обеспечивался рост температуры элементов установки с приемлемым темпом. Контроль режимов работы установки, как и в первом эксперименте, проводился по показаниям термопар и манометра. Диаграмма второго эксперимента показывает успешность такого подхода.

Максимальная температура пара достигла величины 500 °С. При этом его расход стал значительно снижаться. Мощность нагревателя трубки оставалась постоянной, что привело к повреждению элементов теплоизоляции этого нагревателя.

Данный недостаток эксперимента обусловлен малым давлением в водопроводном тракте. В последующих экспериментах будет обеспечена поддержка высокого давления в емкости от баллона с азотом, достаточного для стабилизации расхода питающей воды.



Рисунок 41 – Результаты эксперимента № 2

В третьем эксперименте, график которого показан на рисунке 42, был обеспечен стабильный расход питающей воды в контур образования и перегрева пара. Дополнительно установлено расход задающее устройство для пара. В данном эксперименте удалось получить требуемую температуру пара, при этом поддерживать стабильный расход питательной воды.



Рисунок 42 – Результаты эксперимента № 3

Температура воды на входе в тракт образования и перегрева пара находилась на уровне 110 °С. Наблюдаются флуктуации давления в тракте, которые можно объяснить пульсирующим характером процесса образования пара. В данном эксперименте мощность нагревателя трубки постоянно увеличивалась для компенсации тепловых потерь и поддержания темпа роста температуры пара. Максимальное значение установленной мощности находилось на уровне 1,7 кВт. Достигнута температура перегретого пара близкая к 500 °С на 128 секунде эксперимента.

Во время проведения экспериментов не было замечено возникновения резонансных колебаний трубки. Поэтому измерения частоты вынужденных колебаний не проводились. Очевидно, что они находились за пределами диапазона собственных частот. Отсутствие выраженной вибрации трубки объясняется чистотой внутренней поверхности и отсутствием частиц примесей в воде. В условиях реальной эксплуатации возможно возникновение вибрации труб, при этом необходимо обеспечить безопасный диапазон вынужденных колебаний.

#### 5.8 Выводы по разделу

Разработана схема установки исследования процессов парообразования и перегрева пара. Подобрана запорно-регулирующая арматура, контрольно-измерительное оборудование и программное обеспечение для реализации удаленного управления установкой и регистрации измеряемых параметров. Подтверждена работоспособность отдельных компонентов системы.

Проведен расчет и моделирование процесса нагрева трубки как непосредственным пропусканием электрического тока, так и с использованием омического нагревателя, намотанного на внешнюю поверхность трубки. В обоих вариантах получено равномерное распределение тепла по поверхности трубки и определена временная диаграмма предварительного нагрева.

На основании прочностного расчета выбрана конструкция емкости высокого давления. Выполнен тепловой расчет параметров нагрева емкости. Рассчитана мощность нагревателя, максимальная температура на поверхности теплоизоляционного слоя емкости, а также время, требуемое на нагрев.

Разработана процедура работы установки, включающая подробное описание этапов и режимов работы установки. Оценена продолжительность эксперимента. Данная процедура (Приложение Б) применяется в процессе работы на установке исследования процессов парообразования и перегрева пара в филиале ИАЭ РГП НЯЦ РК.

После сборки установки и монтажа информационно-измерительной системы проведены испытания отдельных узлов установки и комплексные пуско-наладочные работы (Приложение В).

Проведена серия экспериментов по изучению процесса образования и перегрева пара в едином контуре. Показаны результаты данных экспериментов и проведен их анализ. Получена температура перегретого пара близкая к 500 °C, при которой сухость пара составляет не менее 90%.

# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенных исследований по теме диссертации можно сделать следующие выводы:

Впервые разработана расчетная компьютерная модель активной зоны газоохлаждаемого реактора с водным замедлителем для нейтронно-физических расчетов. Выполнен комплекс нейтронно-физических расчетов характеристик вариантов активной зоны газоохлаждаемого реактора и параметров кампании. Показано, что лучшими параметрами и характеристиками обладает компоновка активной зоны газоохлаждаемого реактора, при которой топливом является металлический уран, замедлителем – тяжелая вода, а ТВС размещены с шагом 16 см.

Расчетным путем с применением методов численного моделирования обоснована модернизированная конструкция теплообменного оборудования. Показана его тепловая и экономическая эффективность в сравнении с аналогичным оборудованием наиболее распространенного типа реакторов на тепловых нейтронах BBЭP-1000.

Установлено, что предложенная схема реактора и включения его элементов в цикл Ренкина обеспечивает получение термодинамического КПД на уровне 46 % при температуре нагрева газа 500 °C, максимальном давлении пара 20,0 МПа, использовании хорошо отработанных стержневых твэлов, а удельная масса теплообменных аппаратов газоохлаждаемого реактора, приходящаяся на 1 МВт тепловой энергии вдвое меньше массы парогенераторов реактора ВВЭР-1000.

Проведены экспериментальные работы на установке исследования процессов парообразования и перегрева пара. Установлена реализуемость единого контура подогрева теплоносителя, парообразования и перегрева пара, имитирующего контур АЭС на основе газоохлаждаемого реактора с водным замедлителем и его работоспособность. Достигнутыми результатами экспериментов доказана возможность получения, сухого пара при температуре 500 °C в едином тракте.

#### Оценка полноты решения поставленных задач

Все поставленные задачи диссертационной работы решены в полном объеме. Намеченные экспериментальные работы выполнены, анализ полученных результатов проведен совместно с научными консультантами и коллегами. Полученные результаты и выводы не противоречат основным положениям ядерной, атомной физики и теплофизики. Основная цель диссертационного исследования достигнута.

### Рекомендации по использованию результатов диссертационной работы

Результаты диссертационной работы рекомендуются к использованию в атомной энергетике в сфере проектирования активных зон ядерных реакторов и теплообменного оборудования, а также в учебном процессе в качестве специализированного курса для магистрантов и докторантов технических специальностей [Приложение Г].

## Оценка научного уровня диссертационной работы

Диссертационное исследование по теме «Исследование характеристик расчетной модели газоохлаждаемого реактора с водным замедлителем» затрагивает актуальную проблему поиска путей повышения эффективности атомных электростанций с тепловыми реакторами. В работе предложены оригинальные способы и пути решения технических задач, а также показана способность применять современные компьютерные методы для достижения качественных результатов.

Выражаю огромную благодарность своим научным консультантам: д.ф.м.н., профессору Скакову М.К., д.ф.-м.н., профессору Батырбекову Э.Г., dr. hab. inż., prof. Wieleba W.K. за помощь и поддержку при подготовке диссертационной работы, за ценные советы и консультации в период научной стажировки, при анализе полученных результатов и формулировании основных выводов. а также коллективу отдела разработки и испытаний реакторных устройств Филиала «ИАЭ» РГП «НЯЦ РК» за участие в проведении экспериментальных работ, а также кафедре «Техническая физика и теплоэнергетика» Государственного университета имени Шакарима города Семей и, в частности, заведующей кафедре, к.т.н., доценту Степановой О.А. за помощь в подготовке работы и постоянную поддержку. 1 Велихов Е.П., Ковальчук М.В., Ильгисонис В.И. и др. Эволюционное развитие атомной энергетики в направлении крупномасштабной ядерной энергетической системы с реакторами деления и синтеза // Атомная энергетика: Новые вызовы и стратегические приоритеты, 2017. Вып. 3, С. 12–20.

2 Advanced Boiling Water Reactor (ABWR). Plant General Description - General Electric Nuclear Energy.-1999.-p. 149.

3 Ковецкий В.М., Ковецкая М.М. Направления развития технологий ядерных энергетических установок. Тяжеловодные, жидкометаллические и газовые реакторы. Проблемы атомной энергетики, №14, 2006 С. 25–34

4 Дмитриенко Н.П. Современное состояние проектов реакторов IV поколения с газовым теплоносителем (ВТГР) в мире и перспективы их использования для Украины. Энергетика: экономика, технологии, экология, №1, 2012 С.27–33.

5 Gas-cooled power reactors. Directory of Nuclear Reactors. International Atomic Energy Agency//Vienna. – 1968. – Vol. 7, – P. 243 – 302.

6 Power Reactor Information System, International Atomic Energy Agency (IAEA) / http://www.pris.iaea.org.

7 Z. Tabadar, S. Aghajanpour, M. Jabbari, M. Khaleghi, M. Hashemi-Tilehnoee, Thermal-hydraulic analysis of VVER-1000 residual heat removal system using RELAP5 code, an evaluation at the boundary of reactor repair mode, Alexandria Engineering Journal, Volume 57, Issue 3, 2018, Pages 1249-1259, ISSN 1110-0168, https://doi.org/10.1016/j.aej.2017.03.044.

8 IAEA's web-accessible database ARIS /Advanced Reactors Information System/ https://aris.iaea.org/sites/GCR.html

9 Сидоренко В.А. История атомной энергетики Советского Союза и России. История ВВЭР. Выпуск №2. М., ИздАТ, 2002 – 432 с.

10 Клименко А.В. Ядерная энергетика, у которой есть будущее / Нейтроннофизические проблемы атомной энергетики / Сборник докладов XXIII Межведомственного семинара «Нейтронно-физические проблемы атомной энергетики с замкнутым топливным циклом (Нейтроника-2012)». В 2-х томах. – Обнинск, ФГУП ГНЦ РФ&ФЭИ. 2013. – Том 1. С.107–124.

11 Щепетина Т. Д. О повышении КПД энергоблоков с водо-водяными реакторами (ВВР) // Энергия: экономика, техника, экология. - 2010. - N 12. - С. 21-29. - ISSN 0233-3619.

12 Исаев М.Ш., Бычкова Д.Н. Повышение эффективности использования топлива на АЭС с реакторами ВВЭР / Атомные проблемы энергетики, С. 153-155, 2013.

13 Е.Н. Летягина, У.С. Бабкина. Оценка производственно-экономической эффективности атомной электроэнергетики // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1-1. – С.587.

14 Бурий Ю.Э., Транкач Н.В. К вопросу повышения эффективности использования АЭС // Актуальные проблемы энергетики. Материалы 65-й научно-технической конференции студентов и аспирантов. Минск, 2013.

15 Шаманин И.В., Гаврилов П.М. Высокотемпературные ядерные энергетические технологии. Известия Томского политехнического университета. – 2010.

16 Nesterov V.N. Ensuring of the design value of fuel burnup in hightemperature gascooled reactor with operability graphite. Izvestiya Wysshikh Uchebnykh Zawedeniy. Yadernaya Energetika –  $N_{2} - 2013$ .

17 X. Yuanhui. HTGR advances in China // Nuclear Engineering International, 2005, v.50, No 608, p. 22–25.

18 Zhang, Zuoyi & Wu, Zongxin & Wang, Dazhong & Xu, Yuanhui & Sun, Yuliang & Li, Fu & Dong, Yujie. Current status and technical description of Chinese  $2 \times 250$  MWth HTR-PM demonstration plant // Nuclear Engineering and Design 239 (2009) p. 1212-1219.

19 J.C. Kuijper et al. HTGR reactor physics and fuel cycle studies / Nuclear Engineering and Design 236 (2006) p. 615–634.

20 Handbook of Generation IV Nuclear Reactors, edited by I. Pioro, 2016, p.385 (940), http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-08-100149-3.00001-X, ISBN:9780081001622

21 Исаев А.Н. Реактор с водным теплоносителем малой мощности с топливом на базе шариковых микротвэлов. – Атомная техника за рубежом, 2007, № 8, С.14–20.

22 Исаев А.Н. Применение шариковых микротвэлов реакторов с газовым теплоносителем в малых водо-водяных реакторах. – Атомная техника за рубежом, 2007 №10, С.12–18.

23 Fixed Bed Nuclear Reactor (FBNR) – Brazil, Status of Small Reactor Designs without On-Site Refueling 2007, IAEA-TECDOC-1536, p. 373, IAEA, Vienna, (2007).

24 Sefidvash, Farhang & Amozegar, Ehsan & Sahin, S. & Minh, Do. (2016). Reduction of Environmental Impact of Fixed Bed Nuclear Reactor (FBNR) Waste. Physical Science International Journal. 10. 1-9. 10.9734/PSIJ/2016/25287.

25 A. Benchrif, A. Chetaine, H. Amsil, Neutronic calculations of AFPR-100 reactor based on Spherical Cermet Fuel particles, Annals of Nuclear Energy, Volume 59, 2013, p. 237-242, ISSN 0306-4549, https://doi.org/10.1016/j.anucene.2013.04.017.

26 Long-Life Core Small Nuclear Reactor with Closed Vessel Refueling – Atom For Peace Reactor (AFPR-100) – USA, Status of Small Reactor Designs without On-Site Refueling 2007, IAEA-TECDOC-1536, p. 367, IAEA, Vienna, (2007).

27 Мейер Х.И. и др. Проект эффективного энергоблока мощностью 600 МВт на каменном угле // Электрические станции. 2005. №3. С. 67-71.

28 Новиков В.Н., Радовский И.С., Харитонов В.С. Расчет парогенераторов АЭС: Пособие к курсовому проектированию. Ч. 2. М.: МИФИ, 2001. 68 с.

29 Карапузова Н.Ю., Фокин В.М. Расчет теплообменных аппаратов: методические указания к курсовому и дипломному проектированию // ВолгГАСУ, Волгоград, 2013, 68 с.

30 Анализ цикла Ренкина с учетом необратимых потерь. Методические указания // С-Петербург, 1999, 18 с.

31 Иванов М.Ю. Теплофизические свойства воды и водяного пара. Программный код Parvo 95. Версия 3.3. 2004 г. / http://fortraner.narod.ru/index.htm.

32 Рассохин Н.Г. Парогенераторные установки атомных электростанций: Учебник для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 384 с.: ил.

33 Metropolis N, and Ulam S. The Monte Carlo method. J. Am. Stat. Assoc 44, 1949, p. 335–341.

34 MCNP-5.1.40 Monte-Carlo N-Particle Transport Code; Los Alamos National Laboratory; Los Alamos, New Mexico – April 24, 2003.

35 Solution of neutron transport multigroup equations system in subcritical systems Published in Izvestiya Wysshikh Uchebnykh Zawedeniy, Yadernaya Energetika on November 28, 2017 doi.org/10.26583/NPE.2017.4.04

36 Ермаков, С.М. Метод Монте-Карло в вычислительной математике: Вводный курс [Текст] / С.М Ермаков – СПб.: Невский Диалект; М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. – 192 с.

37 Briesmeister, J.F. MCNP - a general Monte-Carlo Code for neutron and photon Transport [Текст] / Los Alamos National Laboratory. J.F. Briesmeister. – April 24, 2003. – 591 с. – LA-7396M, 1997.

38 MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5. Volume I: Overview and Theory [Tekct] / X-5 Monte Carlo Team. Los Alamos National Laboratory. April 24, 2003. – 340 c. – LA-UR-03-1987.

39 MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5. Volume II: User's Guide [Текст] / X-5 Monte Carlo Team. Los Alamos National Laboratory. April 24, 2003. – 504 с. – LA-UR-03-0245.

40 MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5. Volume III: Developer's Guide [Текст] / X-5 Monte Carlo Team. Los Alamos National Laboratory. April 24, 2003. – 196 с. – LA-UR-03-0284.

41 Программа MC-Delta для расчета характеристик кампании энергетических реакторов: пояснительная записка/ инв. № 257 вн/13-220-01 ДГП ИАЭ РГП НЯЦ РК, В.М. Котов, Р.А. Иркимбеков; Курчатов, Республика Казахстан – 13 февраля 2013.

42 Гарнаев, А.Ю. Visual Basic.NET: разработка приложений [Текст] / А.Ю. Гарнаев. – СПБ.: БХВ-Петербург, 2002. – 624 с.: ил.

43 Иркимбеков Р.А. Энерговыделение в модельной ТВС при тепловых испытаниях в импульсной реакторной установке [Текст]: дис. канд. физ-мат. наук:01.04.14: защищена в 2016 г / Иркимбеков Руслан Александрович. – НИ ТПУ – Томск, 2016, 129 с.

44 R.O. Gauntt, L.L. Humphries, et al. MELCOR Computer Code Manuals Technical Report Reference Manual, vol. 2, Sandia National Laboratories (September 2008) NUREG/CR-6119.

45 S. D. Kalinichenko, A. E. Kroshilin, V. E. Kroshilin et al., "Three-Dimensional Thermal-Hydraulic Best Estimate Code BAGIRA: New Verification Results," in Proceedings of the 11th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-11), Avignon, 2005, Paper 105.

46 Сухарев М.В. Основы Delphi. Профессиональный подход - СПб.: Наука и Техника, 2004. - 600 с.

47 Borland Delphi 7 for Windows: Developer's guide // Borland Software Corporation, 2002. – 1108 p.

48 А.Б. Леонидова, О.А. Степанова, В.А. Витюк, А.С. Сураев. Моделирование режима работы тепловыделяющей сборки реактора на быстрых нейтронах на стационарном уровне мощности // Вестник ГУ им. Шакарима города Семей. – 2018.– №3(83).– С. 99-104. ISSN: 1607-2774

49 М.К. Скаков, Н.А. Сулейменов, В.М. Котов, Г.А. Витюк, А.С. Сураев. О безопасности нерасчетной ситуации в ходе экспериментальных исследований реакторных аварий на ИГР // Вестник ГУ им. Шакарима.– 2019.– Вып.1 (85).– С.96-100. ISSN: 1607-2774

50 Kotov V.M., Idanova D.S., Vityuk V.A., Suraev A.S., Yerygina L.A. Design of a nuclear power plant based on a gas-cooled reactor. - Abstracts of Intern. conf. «21 Century: Nuclear technologies and Nonproliferation problems». - Astana, Kazakhstan, October 7-9, 2015, p. 19.

51 В.М. Котов, В.А. Витюк, Д.С. Иданова, А.С. Сураев, Л.А. Ерыгина. АЭС на основе газоохлаждаемого реактора с водным замедлителем. – Материалы Научно-технической конференции «Нейтронно-физические проблемы ядерной энергетики»», 12–16 окт. 2015 г., Обнинск, Россия, 2015, с. 34-35.

52 Котов В.М., Витюк В.А., Сураев А.С. и др. АЭС на основе газоохлаждаемого реактора. – Материалы всемирного конгресса инженеров и ученых «WSEC-2017, Астана, 19-20 июня 2017 г.», Астана, том 4, с. 318-322.

53 А.С. Сураев, М.К. Скаков, В.К. Виелеба. Расчет характеристик активной зоны и кампании газоохлаждаемого реактора методом Монте-Карло // Вестник КазНИТУ. – 2019.– Вып. 6(136).– С. 362-368.

54 А.С. Сураев, М.К. Скаков, В.М. Котов, Э.Г. Батырбеков. Экспериментальное моделирование процесса образования и перегрева пара до 500 °С в тракте АЭС на основе газоохлаждаемого реактора // Вестник КазНИТУ. – 2017. – Вып. 4(122). – С. 483-488.

55 Красин, А.К. Физико-технические основы создания АЭС с быстрыми газоохлаждаемыми реакторами и с диссоциирующим теплоносителем – четырехокисью азота / А.К. Красин [и др.] // Атомная энергия, – 1972. – т. 32, вып. 3.

56 Gas-cooled power reactors. Directory of Nuclear Reactors. International Atomic Energy Agency//Vienna. – 1968. – Vol. 7, – P. 243 – 302.
57 International Atomic Energy Agency, 2001. Current status and future development of modular high temperature gas cooled reactor technology [Z].IAEA-TECDOC-1198: 13-26

58 Kotov, V. M. Thermal Energetic Reactor with High Reproduction of Fission Materials / Vladimir M. Kotov // Science and Technology of Nuclear Installations, – 2012, doi:10.1155/2012/534541

59 Расчет характеристик газоохлаждаемого реактора с водным замедлителем / В.М. Котов, А.С. Сураев // XIII конференция-конкурс молодых ученых и специалистов НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан, 14-16 мая 2014.

60 Udo Zirn. Hitachi turbine generator technology for nuclear applications / Udo Zirn, Motonari Haraguchi / www.hitachipowersystems.us.

61 Решетников, Ф.Г. Проблемы развития ядерной энергетики / Ф. Г. Решетников // Атомная энергия, – 2010. – т. 10, вып. 6, – С. 353 – 354.

62 Котов В.М., Сураев А.С. Расчет характеристик газоохлаждаемого реактора с водным замедлителем. – Вестник НЯЦ РК, вып. 3, 2014, с. 87-93.

63 V.M. Kotov, G.A. Vityuk and A.S. Suraev. Possibilities of gas-cooled watermoderated reactors. – Atomic Energy, Vol. 116, No. 1, May, 2014. – p. 6–13.

64 Канальный ядерный реактор с интегральными коллекторами: инновационный патент Республики Казахстан. Котов, В. М. Котов С. В. – заявка № 21276 от 25.03.2009.

65 Advanced Boiling Water Reactor (ABWR). Plant General Description // General Electric Nuclear Energy. –1999. – P. 149.

66 Conlin, J.L. etc. Listing of available ACE data tables [Текст] / Los Alamos National Laboratory report LA-UR-13-21822. – June 3, 2013. – 502 р.

67 Котов В.М., Витюк Г.А., Иркимбеков Р.А., Мухаметжарова Р.А. Сопряжение тяжеловодного газоохлаждаемого реактора с циклом Ренкина. // Алматы. International Conference "Nuclear and Radiation Physics", 20-23 September 2011.

68 АЭС на основе газоохлаждаемого реактора с водным замедлителем [Текст]: отчет о НИР / Филиал «Институт атомной энергии» РГП «НЯЦ РК»; рук. В.М. Котов, В.А. Витюк – Курчатов, 2017. – 43 с. Инв. №0217РК00852

69 Котов В.М., Р.А. Иркимбеков. Расчет характеристик кампании энергетических реакторов // Вестник НЯЦ РК – 2011. – вып. 3. – С. 14-17.

70 Котов В.М., Ерыгина Л.А., Иданова Д.С., Сураев А.С. Тепловой реактор высокой эффективности. – Материалы X Международной конференции «Ядерная и радиационная физика», 8-11 сент. 2015 г., Курчатов, НЯЦ РК, 2015, с. 104-111.

71 Акаев С.О., Диков А.С., Кислицин С.Б., Ларионов А.С. Охрупчивание стали X18H10T, облученной нейтронами в среде гелия при высокой температуре // Известия высших учебных заведений. Физика – 2019. Т. 62. № 12 (744). – С. 187-188.

72 Сураев А.С., Котов В.М. Исследование процессов теплообмена в схеме АЭС с газоохлаждаемым реактором. – Вестник НЯЦ РК, вып. 3, 2015, с. 65-71.

73 Котов В.М., Зеленский Д.И. Газоохлаждаемый реактор с высоким коэффициентом полезного действия. Межотраслевая межрегиональная научнотехническая конференция "Перспектива развития атомных станций малой мощности в регионах, не имеющих централизованного электроснабжения". Москва, 11-12 ноября 2010 г.

74 Котов В. М. Возможности газоохлаждаемых реакторов с водным замедлителем / Котов В.М., Витюк Г.А, Сураев А.С // Вестник НЯЦ РК – 2012. – Вып. 4. – С. 20–27.

75 Сулейменов Н.А., Витюк В.А., Котов В.М. Тепловой расчет теплообменников газоохлаждаемого канального реактора. – Материалы конференции «International scientific review of the problems and prospects of Modern science and education». Мюнхен, Германия, 7-8 мая 2015.

76 Кирилов, П.Л. Справочник по теплогидравлическим расчетам (ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы) [Текст] / П.Л. Кирилов, Ю.С. Юрьев, В.П. Бобков – Москва, Энергоатомиздат, 1990.

77 Маргулова Т. Х. Атомные электрические станции. Учебник для вузов. – Изд. 5-е. – М.: ИздАТ, 1994. – 289 с.

78 Сулейменов Н.А., Витюк В.А., Котов В.М. Построение t-q диаграммы теплообменников газоохлаждаемого реактора. – «Проблемы современной науки и образования / Problems of modern science and education»: Научно-методический журнал. – Москва: Изд. «Проблемы науки». – 2015. №5» (35) 2015. – 26-29.

79 Kotov, V. M. Termal Reactors with High Reproduction of Fission Materials / V. M. Kotov / Nuclear Power – Practical Aspects. Edited by Wael Ahmed. – P.179 – 218. http://dx.doi.org/10.5772/2580.

80 Стали и сплавы. Марочник: Справ. изд. / В.Г. Сорокин, М.А. Гервасьев – М.: «Интермет Инжиниринг», 2001. – 608 с.: ил.

81 Давиденко С.Е., Трунов Н.Б., Григорьев В.А. и др. Работоспособность теплообменных труб и управление ресурсом парогенераторов АЭС с ВВЭР / ФГУП ОКБ «Гидропресс», г. Подольск, 2005.

82 Urban T.V., Melikhov V.I., Melikhov O.I. Mathematical simulation of thermohydraulic processes in a PGV-1000 horizontal steam generator // Thermal Engineering. 2002. T. 49. № 5. C. 425-430.

83 ANSYS Fluent User's guide. Release 14.5, 2012 [Электронный ресурс]: ANSYS Inc. – Электрон. дан. и прогр.– [Б. м.], November, 2011.

84 ANSYS Fluent Theory Guide. Release 14.5, 2012 [Электронный ресурс]: ANSYS Inc. – Электрон. дан. и прогр.– [Б. м.], November, 2017.

85 V. Kotov, M. Skakov, A. Surayev, L. Yerygina. Characteristics of gas-cooled reactor with water moderator and Rankine cycle. – Abstracts of VII Eurasian conf. «Nuclear Science and its application, Baku, October 21-24, 2014», Baku, IRP ANAS, 2014, p. 307-308.

86 IAEA's web-accessible database ARIS /Advanced Reactors Information System/ https://aris.iaea.org/sites/overview.html

87 А.С. Сураев, В.М. Котов, М.К. Скаков, Батырбеков Э.Г., Виелеба В.К. Исследование парообразования и перегрева пара в тонкостенных теплообменных трубах. //Вестник НЯЦ РК. – 2016. – Вып. № 1.– С. 73-76.

88 Н.А. Сулейменов, В.М. Котов, В.А. Витюк, А.С. Сураев. Исследование характеристик теплообменных трубок АЭС в условиях интенсивного парообразования и перегрева пара. // Сборник трудов VIII Международной научно-практической конференции. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета. – 2016.– С.57-58.

89 Ключников А.А., Шараевский И.Г., Фиалко Н.М. и др. Теплофизика повреждений реакторных установок: монография. НАН Украины, Институт Проблем Безопасности АЭС. – Чернобыль, 2013. – 528 с.

90 Б.И. Лукасевич, Н.Б. Трунов, Ю.Г. Драгунов, С.Е. Давиденко. Парогенераторы реакторных установок ВВЭР для атомных электростанций. М.: ИКЦ «Академкнига», 2004, 391 с.

91 С.Е. Давиденко, Н.Б. Трунов. Продление ресурса парогенераторов РУ с ВВЭР-440. Вопросы атомной науки и техники. Серия: Обеспечение безопасности АЭС. Вып. 9. Реакторные установки с ВВЭР. с. 38.

92 М.К. Скаков, В.М. Котов, А.С. Сураев. Разработка экспериментальной установки для исследования процессов испарения и перегрева пара в едином контуре АЭС. – Вестник КазНАЕН РК, № 3-4, 2016, с. 66-69

93 Бергункер В.Д. Целостность теплообменных труб вертикальных и горизонтальных парогенераторов (сравнительный анализ ч.2) [Электронный ресурс]/ Материалы 8-го международного семинара по горизонтальным парогенераторам ОАО ОКБ «Гидропресс», Подольск, Россия, 19-21 мая 2010 г.

94 Трунов Н.Б., Лукасевич Б.И., Сотсков В.В. и др. Прошлое и будущее горизонтальных парогенераторов [Электронный ресурс]/ ФГУП ОКБ «Гидропресс», 2007, г. Подольск. Режим доступа: http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/seminar7/documents/f55.pdf

95 Викин В.А., Жбанников В.В., Прытков А.Н. Работоспособность теплообменных труб парогенераторов Нововоронежской АЭС с реакторами ВВЭР-440 и ВВЭР-1000 // Сб. трудов конф. 4-я МНТК «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР», 23-26.05.2005, Подольск, Россия.

96 Kroshilin, A.E., Kroshilin, V.E. & Smirnov, A.V. Numerical investigation of three-dimensional flows of steam-water mixture in the housing of the PGV-1000 steam generator // Thermal Engineering, v. 55, p. 372–379. – 2008. https://doi.org/10.1134/S0040601508050030

97 Патент РК на полезную модель №3113. Устройство исследования процессов парообразования и перегрева пара /В.М. Котов, А.С. Сураев, М.К. Скаков; опуб. 17.09.2018, бюл. №35, 1 с.

98 Решение о создании демонстрационной установки для отработки процесса получения и перегрева пара / Филиал «Институт атомной энергии» РГП «НЯЦ РК», Курчатов, 2016 г. Инв. №11-220-01/1591вн от 10.10.2016 г.

99 Установка для исследования парообразования и перегрева пара в едином контуре АЭС. Техническое задание на разработку технического проекта. Инв.

№11-220-02/1290вн от 17.08.2016 г.– Филиал «Институт атомной энергии» РГП «НЯЦ РК» – Курчатов. – 2016.

100 ANSYS CFX-Solver Theory Guide. Particle Transport Theory. Heat and<br/>Mass Transfer. http://www.kxcad.net/ansys/ANSYS\_CFX/help/Theory/i1308531.html

101 ГОСТ Р 52857.2–2007. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет цилиндрических и конических обечаек, выпуклых и плоских днищ и крышек. [Текст]. – Введ. 2008-04-01. 41 с.

102 ГОСТ 52857.1-2007. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Общие требования. [Текст]. – Введ. 2008-04-01. 26 с.

103 ГОСТ 8.563.1-97. Измерение расхода и количества жидкостей и газов методом переменного перепада давления. Диафрагмы, сопла ИСА 1932 и трубы вентури, установленные в заполненных трубопроводах круглого сечения. Технические условия. [Текст]. – Введ. 1999-01-01. 55 с.

104 Prakash V., Thirumalai M., Prabhakar R., Vaidyanathan G. Assessment of flow induced vibration in a sodium-sodium heat exchanger. Nuclear Engineering and Design, 2009, vol. 239, no. 1, pp. 169–179.

105 Thirumalai M. Experimental investigation of flow-induced vibration in PFBR steam generator sector model. Int. J. Nuclear Energy Science and Technology, 2007, vol. 3, no. 1, pp. 88–108.

106 Иванов Д.В., Доль А.В. Введение в Ansys Workbench: Учеб.-метод. пособие для студентов естественно-научных дисциплин. – Саратов: Амирит, 2016. – 56 с.: ил. ISBN 978-5-9909127-0-0

107 Chen Xiaolin, Liu Yiijun. Finite Element Modeling and Simulation with ANSYS Workbench. – CRC Press, 2014. – 411 p.

108 Приборы виброизмерительные. Вибротест- МГ4. Руководство по эксплуатации. КБСП.427768.026 РЭ, Челябинск, 2012. – 36 с.

109 SCADA-система Trace Mode/ Сост. И. П. Ефимов, Д. А. Солуянов.— Ульяновск: УлГТУ, 2010г.— 158 с.

# ПРИЛОЖЕНИЕ А

Патент на полезную модель «Устройство исследования процессов парообразования и перегрева пара» и удостоверение автора

(19) МИНИСТЕР	СТВО ЮСТИЦИИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН
	ПАТЕНТ
(11)	№ <u>3113</u>
(12)	НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ
<ul> <li>(73) ПАТЕНТООБЛАД, праве хозяйственного вед Министерства энергетик</li> <li>(72) АВТОР (АВТОРЫ) (КZ); Скаков Мажын Кан</li> </ul>	АТЕЛЬ: Республиканское государственное предприятие на дения "Национальный ядерный центр Республики Казахстан и Республики Казахстан (КZ) : Котов Владимир Михайлович (КZ); Сураев Артур Сергеев напинович (КZ)
(21) Заявка № 2017/087	1.2 (22) Дата подачи заявки: 28.12.2
Зарегистрирован в Госуд 25.08.2018.	дарственном реестре полезных моделей Республики Казахо
Пойстрио	оостраняется на всю территорию Республики Казахстан оплаты поддержания патента в силе.
условии своевременной	
деиствие патента распр условии своевременной о Вице-министр юстиции Республики Казахстан	H. I

## ПРИЛОЖЕНИЕ А (продолжение)



МИНИСТЕРСТВО ЮСТИЦИИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

# удостоверение автора

## № 104250

Настоящим удостоверяется, что Сураев Артур Сергеевич (KZ)

и Котов Владимир Михайлович (КZ); Скаков Мажын Канапинович (КZ)

является(ются) автором(ами) полезной модели

(11) 3113

(54) Устройство исследования процессов парообразования и перегрева пара

(73) Патентообладатель: Республиканское государственное предприятие на праве хозяйственного ведения "Национальный ядерный центр Республики Казахстан" Министерства энергетики Республики Казахстан (KZ)

(21) 2017/0871.2(22) 28.12.2017

Вице-министр юстиции Республики Казахстан

Н. Пан

#### ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Акт внедрения «Процедуры подготовки и проведения экспериментов на установке исследования процессов парообразования и перегрева пара» в производственный процесс

> «УТВЕРЖДАЮ» Первый замесритель директора в.В. Бакланов « & 1» иссля 2019 г. АКТ и и одо -01/925 ви

о внедрении «Процедуры подготовки и проведения экспериментов на установке исследования процессов парообразования и перегрева пара»

г. Курчатов

« 28 » шен 2019 г.

Мы, нижеподписавшиеся, Пахниц А.В. – начальник отдела разработки и испытаний реакторных устройств, сотрудники лаборатории исследований теплофизических и нейтронно-физических характеристик облучательных устройств: Иркимбеков Р.А. – начальник лаборатории, Сураев А.С. – научный сотрудник лаборатории, Сулейменов Н.А. – младший научный сотрудник лаборатории, Жанболатов О.М. – инженер 2 категории лаборатории составили акт о внедрении «Процедуры подготовки и проведения экспериментов на установке исследования процессов парообразования и перегрева пара» (далее Процедура). Процедура разработана в рамках выполнения проекта грантового финансирования по теме «АЭС на основе газоохлаждаемого реактора с водным замедлителем».

Данная Процедура устанавливает основные принципы и подходы к проведению экспериментов, в процессе которых будут производиться исследования характеристик процессов, сопровождающих интенсивное кипение и парообразование в едином тракте АЭС с газоохлаждаемым реактором. К определяемым характеристикам процесса относятся температура питательной воды перед кипением, перегретого пара на выходе из тракта и поверхности тракта, сухость получаемого пара, амплитуда и частота вынужденных колебаний тракта, избыточное давление в тракте.

Для определения основных характеристик процесса образования и перегрева пара применяется установка исследования процессов парообразования и перегрева пара, включающая емкость с питательной водой, единый тракт образования и перегрева пара, запорно-регулирующую арматуру, расходозадающие устройства, средства измерения параметров и информационно-управляющую систему.

В качестве основных средств измерения температуры на установке используются термоэлектрические преобразователи типа XA (хромельалюмелевые термопары).

Для измерения характеристик вынужденных колебаний тракта установки применяется виброметр «Вибротест-МГ4» с магнитным пьезодатчиком.

Основным средством измерения давления в емкости и тракте образования и перегрева пара является манометр.

Для регистрации показаний средств измерений экспериментальной установки и управления работой нагревателя используется информационноуправляющая система, разработанная с помощью SCADA системы Trace Mode 6.

Процедура включает в себя следующие этапы:

подготовка оборудования, заполнение емкости водой, подключение средств измерения;

разработка диаграммы нагрева тракта образования и перегрева пара;

 настройка информационно-управляющей системы, проверка работоспособности автоматики;

проведение пуско-наладочных работ, отработка диаграммы нагрева;

 проведение эксперимента в соответствии с регламентом, регистрация параметров установки;

обработка результатов экспериментов, сбор данных эксперимента в таблицах Excel;

 – анализ полученных данных, включающий построение графиков и диаграмм.

#### Заключение

 Работы по внедрению Процедуры выполнены в полном объеме и в заданные сроки.

 Разработанная Процедура может быть использована в практической деятельности при проведении исследований, связанных с процессами парообразования и перегрева пара.

Начальник отдела 220

Начальник лаборатории 222

Научный сотрудник лаборатории 222

Младший научный сотрудник лаборатории 222

Инженер 2 категории лаборатории 222

А.В. Пахниц Фр.А. Иркимбеков Адог А.С. Сураев И.А. Сулейменов О.М. Жанболатов

Исп. Сулейменов Н.А. тел. 41-25 в дело 11-220-01

#### ПРИЛОЖЕНИЕ В

## Протокол проведения испытаний установки исследования процессов парообразования и перегрева пара

					«УТВЕРЖДАЮ»
			Пе	рвый замес	титель директора
			*		В.В. Бакланов 2020 г.
	Г	іротокол			
испытани	й установки исследования п	роцессав пар	юооразо	вания и пеј	регрева пара
. Курчатов	N11. 220-01/83 Pm		(16 »	01	2020 г.

Мы, нижеподписавшиеся, Пахниц А.В. – начальник отдела разработки и испытаний реакторных устройств, сотрудники лаборатории исследований теплофизических и нейтроннофизических характеристик облучательных устройств: Иркимбеков Р.А. – начальник лаборатории, Сураев А.С. – научный сотрудник лаборатории, Сулейменов Н.А. – младший научный сотрудник лаборатории составили протокол испытаний установки исследования процессов парообразования и перегрева пара (далее Установка). Установка разработана в рамках финансируемого грантового проекта по теме «АЭС на основе газоохлаждаемого реактора с водным замедлителем».

Установка предназначена для проведения экспериментальных работ, связанных с исследованием процессов образования и перегрева пара в едином тепловом контуре, который имитирует первый контур АЭС на основе газоохлаждаемого реактора с водным замедлителем.

Установка разработана в соответствии с техническим проектом, работы на установке проводятся согласно утвержденной Процедуре (Акт №11-220-01/925вн от28.05.2019 г. о внедрении «Процедуры подготовки и проведения экспериментов на установке исследования процессов парообразования и перегрева пара»)

Цель испытаний: проверка работоспособности элементов установки, в частности: запорнорегулирующей арматуры, средств измерения параметров, системы управления и контроля параметров, а также вспомогательных систем.

Виды проведенных испытаний:

настройка информационно-управляющей системы (ИУС);

- контроль герметичности емкости предварительного подогрева воды;

проверка работоспособности электромагнитных клапанов;

испытание нагревателей в различных режимах работы;

 контроль заданных расходов рабочих тел, температурных режимов, перепада давления и сухости перегретого пара;

обеспечение заданных параметров пара на выходе из тракта;

проверка целостности тепло- и электроизоляции участков установки;

- комплексные пуско-наладочные испытания;

 – отработка режима штатного расхолаживания и приведения установки в условно безопасное состояние.

По результатам проведенных испытаний можно сделать заключение о том, что Установка исследования процессов парообразования и перегрева пара соответствует заданным характеристикам и может быть использована при проведении экспериментальных работ для решения научно-технических задач.

Недостатков в конструкции установки или отклонений от проектных параметров в период проведения испытаний не выявлено.

Начальник отдела 220

Исп. Иркимбеков Р.А. тел. 43-69 в дело 11-220-01

Начальник лаборатории 222

Научный сотрудник лаборатории 222

Младший научный сотрудник лаборатории 222

А.В. Пахниц Р.А. Иркимбеков А.С. Сураев Н.А. Сулейменов

### ПРИЛОЖЕНИЕ Г

# Акт внедрения результатов научно-исследовательской работы в учебный процесс

#### **УТВЕРЖДАЮ**



#### АКТ

внедрения результатов научно-исследовательской работы Сураева А.С.

Комиссия в составе:						
Председатель:	Кливенко А.Н., PhD. и.о. проректора по науке и					
	коммерциализ	ации				
Члены комиссии:	Байбалинова	Г.М.,	к.т.н.,	зам.	декана	

инженерно-технологического факультета Степанова О.А., к.т.н., доцент, зав. кафедрой «Техническая физика и теплоэнергетиа»

подтверждает, что результаты научно-исследовательской работы Сураева Артура Сергеевича по теме диссертации «Исследование характеристик расчетной модели газоохлаждаемого реактора с водным замедлителем» внедрены в учебный процесс и использованы при изучении дисциплин «Атомные электростанции», «Безопасность эксплуатации ядерных энергетических установок» на кафедре «Техническая физика и теплоэнергетика» Университета имени Шакарима города Семей, а также при изучении дисциплин «Ядерные исследовательские ядерные реакторы», «Физика реакторов» на базе филиала кафедры в «Национальном ядерном центре» Республики Казахстан.

Внедрение результатов научно-исследовательской работы дает возможность обучающимся в бакалавриате и магистратуре изучить методы и этапы разработки активных зон реакторных установок, освоить выполнение комплексных расчетов теплового оборудования первого контура и получить навыки работы с современными компьютерными программами, применяемыми при проведении подобных исследований.

Председатель комиссии:

А.Н. Кливенко

Члены комиссии:

Allung

Г.М. Байбалинова

О.А. Степанова