



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ



*Альбом посвящен
70-летию кафедры Атомных
электрических станций МЭИ*

АЛЬБОМ

ВЫПУСКНЫХ КВАЛИФИКАЦИОННЫХ РАБОТ БАКАЛАВРИАТА
КАФЕДРЫ АЭС НИУ МЭИ

Москва

НИУ МЭИ

2026г.

АННОТАЦИЯ

В настоящем альбоме приведены примеры выпускных квалификационных работ (ВКР) бакалавров, выполненных на кафедре АЭС в последние годы, а также материалы, которые могут быть полезны студентам при выполнении ВКР, выборе направлений и планировании своей научной деятельности и имеющие отношение к научной деятельности студентов кафедры АЭС.

Примеры работы охватывают весьма широкий спектр тем, присутствующих в практике атомной энергетики РФ, включая разработку новых конструкций, исследования в области вычислительной гидродинамики, нормативные требования, тематику как атомной

энергетики больших мощностей, так и атомных станций малой мощности (АСММ).

Помимо собственно материалов ВКР, приведены некоторые другие результаты научной деятельности студентов кафедры АЭС, в частности, материалы, относящиеся к выступлениям студентов на МНТК МЭИ.

Также в альбоме приведены материалы, которые могут быть полезны студентам при выполнении работ (требования к оформлению, основные методические рекомендации по выполнению работ и ряд других).

Начинается альбом краткой справкой по истории кафедры АЭС – старейшей в Европе и одной из старейших в мире кафедр атомного профиля.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
О КАФЕДРЕ АЭС НИУ МЭИ	4
СТУДЕНТЫ БАКАЛАВРИАТА И НАУКА	5
ПАМЯТКА по выполнению ВКР бакалавра по специальности АЭС	11
ПРИМЕРЫ презентаций ВКР бакалавров	15
ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ АЭС	16
ГИДРОДИНАМИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ	31
АНАЛИЗ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ АЭС И АСММ	73
РАЗРАБОТКА ОСНОВНОГО ОБОРУДОВАНИЯ АЭС И АСММ	104
МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЯЖЁЛЫХ АВАРИЙ НА АЭС	138
ЯДЕРНЫЕ ТОПЛИВНЫЕ ЦИКЛЫ И ЗАМЫКАНИЕ ЯТЦ	178
ВЫВОД АЭС ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ	197
ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ МОНИТОРИНГА	225
АККУМУЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГИИ НА АЭС	254
ПРИМЕРЫ ЧЕРТЕЖЕЙ ВКР	286

О КАФЕДРЕ АЭС НИУ МЭИ

Кафедра атомных электрических станций (АЭС) Национального исследовательского института "МЭИ" основана в 1956 году и является старейшей кафедрой атомно-энергетического профиля в Европе. Организатором кафедры, где началась подготовка инженеров для новой научно-технической отрасли – атомной энергетики, и первой заведующей была профессор Т.Х. Маргулова. Основной задачей кафедры с момента ее создания и до настоящего времени являлась и остается подготовка высококвалифицированных специалистов для предприятий атомной отрасли.

Большой вклад в становление и развитие кафедры внесли крупные ученые и специалисты промышленности и отраслевых научно-исследовательских институтов. Среди них члены-корреспонденты АН СССР: В.А. Сидоренко, Г.Н. Кружилин; профессора: Н.М. Синев, А.С. Коченов, В.В. Герасимов, В.Ф. Титов, Г.А. Бать, Л.М. Воронин.

За время своего существования кафедра АЭС внесла весомый вклад в подготовку кадров для атомной

промышленности страны. Деятельность кафедры по обеспечению преемственности знаний, преодолению дефицита кадров и повышения качества их подготовки, получила поддержку ведущих специалистов атомной отрасли и способствовала включению в 2011 году Национального исследовательского университета "МЭИ" в Ассоциацию "Консорциум опорных вузов Госкорпорации "Росатом".

Выпускники кафедры АЭС составляют управленческую и техническую элиту Госкорпорации «Росатом», АО «Атомэнергопроект», концерна «Росэнергоатом» и других ключевых организаций отрасли. Именно наши инженеры стояли у истоков пуска первых советских реакторов, а сегодня они руководят строительством и эксплуатацией новых энергоблоков как в России, так и за рубежом, обеспечивая технологический суверенитет и энергетическую безопасность страны.

СТУДЕНТЫ БАКАЛАВРИАТА И НАУКА

Студенты бакалавриата принимают активное участие в научной жизни кафедры. Многие из них уже на 3-4 курсах ведут активную научную деятельность. Некоторые имеют результаты, достойные внимания МНТК МЭИ. Для многих студентов путь в науку начинается именно с выполнения НИР в рамках бакалаврской работы и выступлений на МНТК МЭИ.

Об МНТК МЭИ

Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов "Радиоэлектроника, электротехника и энергетика" проводится с 1994 г. ежегодно в конце февраля – начале марта на базе НИУ "МЭИ".

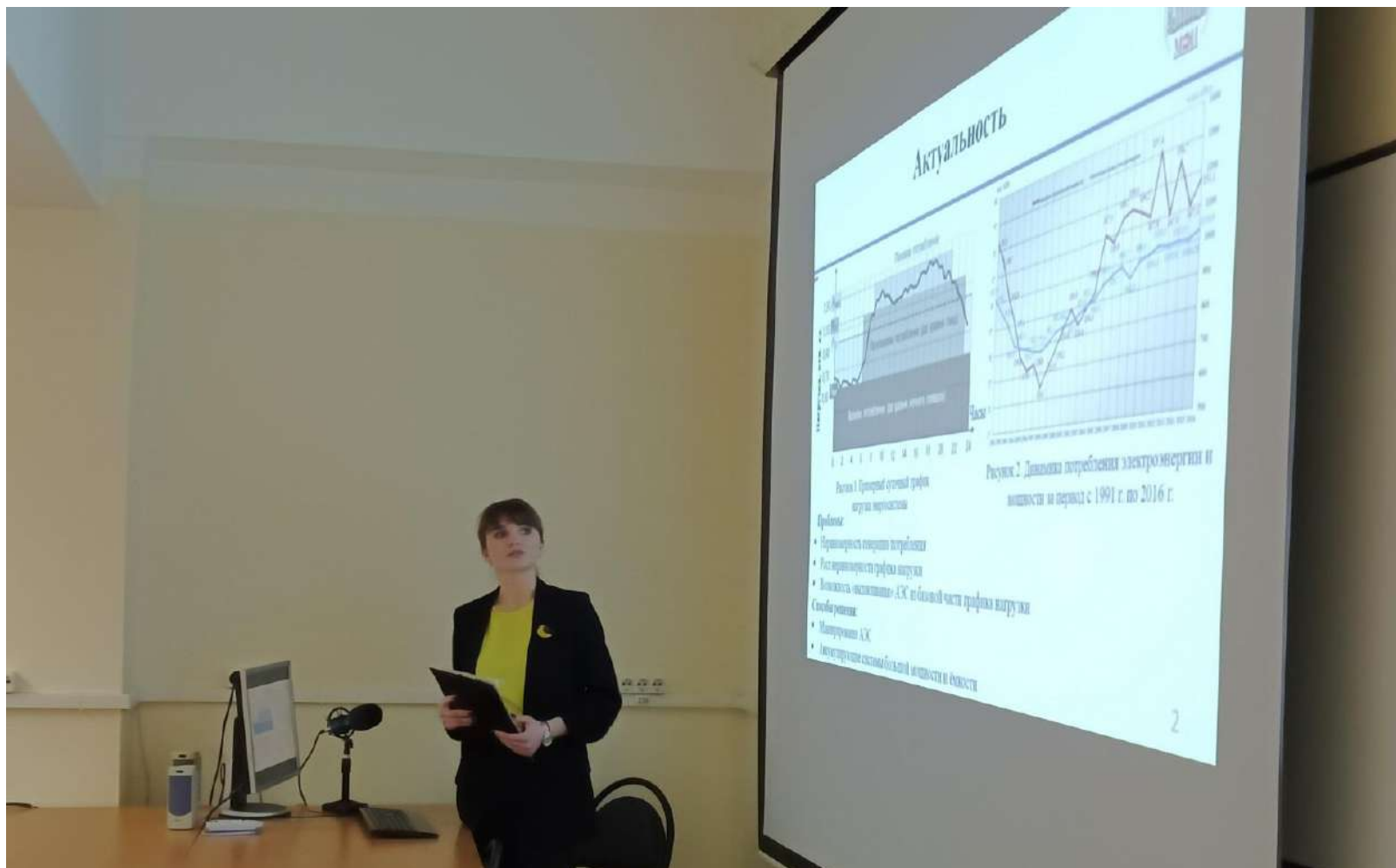
Цель проведения конференции – развитие творческой активности студентов, аспирантов и молодых ученых, привлечение их к решению актуальных задач современной науки, сохранение и развитие единого научно-образовательного пространства, установление контактов между будущими коллегами.

Задача конференции состоит в ознакомлении участников с современными проблемами радиоэлектроники, электротехники и энергетики. Обзорные доклады ведущих ученых знакомят её участников с новейшими направлениями научно-технического прогресса.

Конференция аккредитована в программе "Участник Молодежного Научно-Инновационного Конкурса" (УМНИК).

Тезисы докладов конференции публикуются в электронном виде с присвоением ISBN и регистрацией издания в Книжной палате и размещаются в системе РИНЦ.

Дипломы и сертификаты победителей и участников МНТК МЭИ дают преимущества при назначении именных и повышенных стипендий, поступлении в магистратуру и аспирантуру. Наличие наград научных конференций также очень позитивно оценивается работодателями.



Студентка группы ТФ-12-19 Торхова Д.А. выступает с докладом на МНТК МЭИ 2023



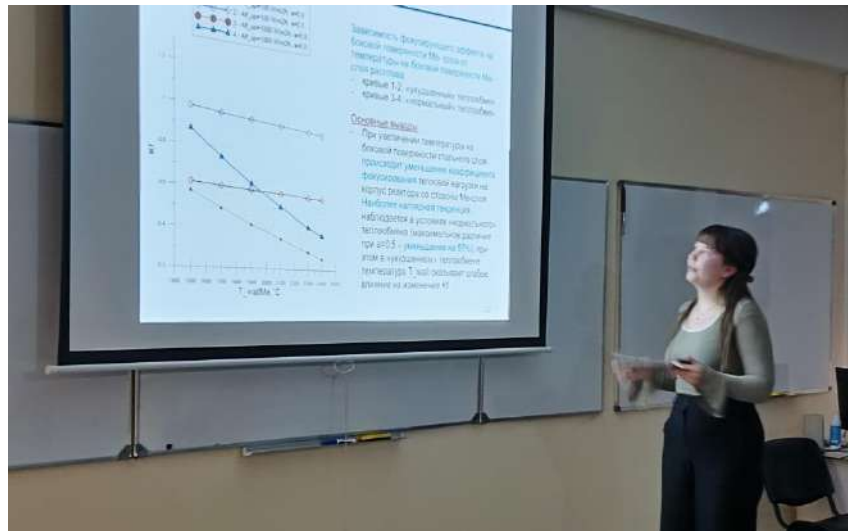
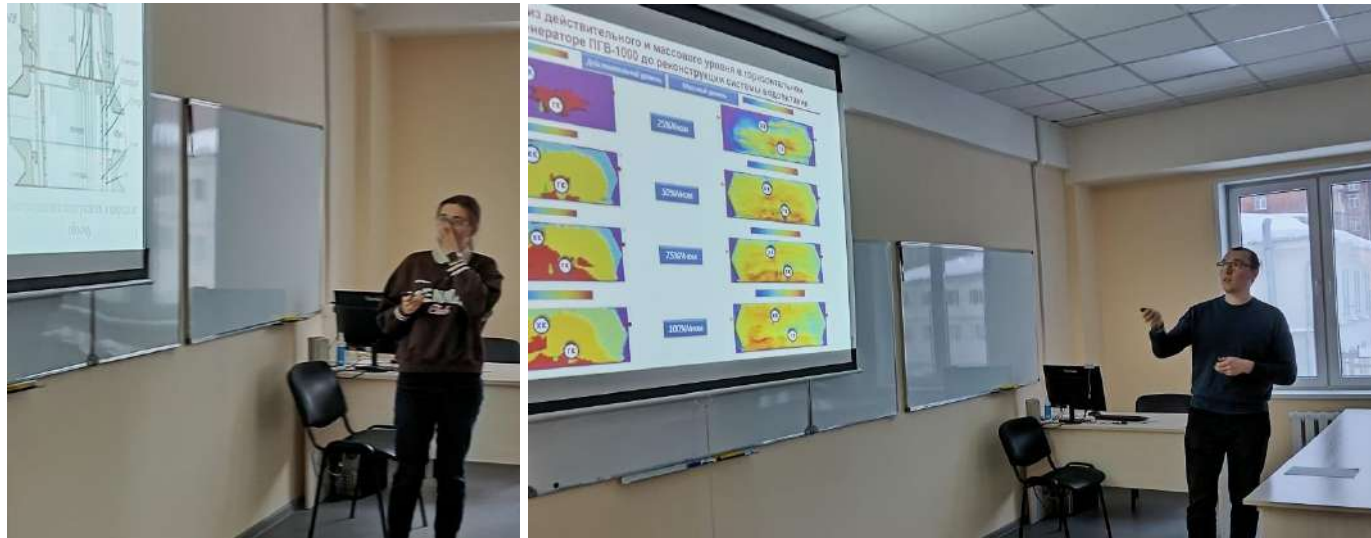
Восхищенные участники МНТК МЭИ 2023 внимают слову докладчика



Победители и призеры МНТ МЭИ 2023 после награждения



Студентка группы ТФ-12-22 Муратова А.Д. выступает с докладом на МНТК МЭИ 2026



Докладчики и участники МНТК МЭИ 2026



Заведующая кафедрой АЭС Хвостова М.С. вручает награды победителям МНКТ МЭИ 2026


НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ "МЭИ"

ТРИДЦАТЬ ВТОРАЯ
 МЕЖДУНАРОДНАЯ
 НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
 СТУДЕНТОВ И АСПИРАНТОВ

**РАДИОЭЛЕКТРОНИКА,
 ЭЛЕКТРОТЕХНИКА
 И ЭНЕРГЕТИКА**

**ПОЧЕТНЫЙ
 ДИПЛОМ**

I степени

*Горбуновой Л.А., рук. Локтисев В.В.
 (НИУ "МЭИ", АО "ЭНИЦ")*

за доклад на тему: *Оценка влияния температурных условий на динамику быстрого демпфера скорости в ста-
 тифицированной среде растительной биомассы по данным
 пассивной радиолокационной системы на основе сверхшироко-
 полосы при низком уровне*

Ректор НИУ "МЭИ"  Н.Д.Роголев
 Председатель секции  М.С.Абрамова

МОСКВА 2026 год











НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ "МЭИ"

ТРИДЦАТЬ ВТОРАЯ
 МЕЖДУНАРОДНАЯ
 НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
 СТУДЕНТОВ И АСПИРАНТОВ

**РАДИОЭЛЕКТРОНИКА,
 ЭЛЕКТРОТЕХНИКА
 И ЭНЕРГЕТИКА**

**ПОЧЕТНЫЙ
 ДИПЛОМ**

II степени

*Муратовой Л.В., рук. Каверзнев М.И.
 (НИУ "МЭИ")*

за доклад на тему: *Вопросы классификации НКРТ
 в тепловых циклах АЭС.*

Ректор НИУ "МЭИ"  Н.Д.Роголев
 Председатель секции  М.С.Абрамова

МОСКВА 2026 год










Дипломы победителей МНТК МЭИ 2026

ПАМЯТКА

по выполнению выпускной квалификационной работы бакалавра по специальности АЭС

Выпускная квалификационная работа (ВКР) бакалавра — это самостоятельное комплексное исследование, которое демонстрирует уровень теоретической и практической подготовки студента к решению профессиональных задач в области проектирования, эксплуатации или обеспечения безопасности атомных электростанций. Работа предназначена для систематизации знаний, закрепления навыков инженерного анализа и обоснования выбранных технических решений.

Как правило, ВКР состоит из двух частей: основная часть (обычно это расчет парогенератора или иного теплообменного аппарата) и спейвопроса, в котором углубленно рассматривается тот или иной вопрос, относящийся к тематике АЭС.

Тематика работ

Тема ВКР должна быть актуальной, соответствовать профилю подготовки «Атомные электрические станции» и иметь практическую

направленность. Рекомендуется выбирать темы, связанные с:

проектированием основного и вспомогательного оборудования АЭС;

расчетом и анализом тепловых схем и технико-экономических показателей энергоблока;

вопросами ядерной, радиационной и экологической безопасности;

системами контроля, управления и защиты реакторной установки;

модернизацией и продлением срока службы оборудования станций.

Требования к объему и содержанию

Объем пояснительной записки обычно составляет 50–70 страниц машинописного текста (без приложений).

Структура работы должна включать следующие обязательные разделы:

Введение: обоснование актуальности темы, определение цели и задач исследования, описание объекта и предмета изучения.

Обзор литературы и постановка задачи: анализ существующих технологий и решений, формулировка конкретной технической проблемы.

Специальный (проектно-конструкторский или исследовательский) раздел: основная часть, содержащая расчеты, моделирование процессов, выбор оборудования, разработку алгоритмов или проведение экспериментов.

Раздел по безопасности жизнедеятельности и экологии: оценка воздействия на окружающую среду, анализ надежности систем, мероприятия по обеспечению охраны труда.

Экономическая часть: расчет капитальных вложений, эксплуатационных затрат и экономической эффективности предложенных решений.

Заключение: краткие выводы по результатам выполненной работы, подтверждающие достижение поставленной цели.

Список использованных источников.

Приложения: чертежи, громоздкие таблицы, промежуточные расчеты.

Оформление

Работа выполняется в текстовом редакторе на листах формата А4. Основные правила оформления:

Шрифт: Times New Roman, размер (кегель) — 14 пт для основного текста.

Междустрочный интервал: полуторный.

Выравнивание: по ширине страницы.

Поля: левое — 30 мм, правое — 15 мм, верхнее и нижнее — по 20 мм.

Абзацный отступ: 1,25 см.

Нумерация страниц сквозная, арабскими цифрами, располагается внизу по центру или справа. Титульный лист включается в общую нумерацию, но номер на нем не проставляется.

Иллюстрации (рисунки), таблицы и формулы должны иметь сквозную нумерацию в пределах раздела и сопровождаться подписями. Формулы выравниваются по центру, их номера указываются в круглых скобках у правого края страницы.

Соблюдение данных требований является обязательным условием для допуска работы к защите.

ПРИМЕРЫ презентаций
выпускных квалификационных работ

ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ АЭС: философия глубокоэшелонированной защиты

Безопасность атомной электростанции — это не просто набор систем, а фундаментальная философия, пронизывающая все этапы её жизненного цикла: от проектирования и строительства до эксплуатации и вывода из работы. В основе этой философии лежит принцип глубокоэшелонированной защиты, который предусматривает создание системы из нескольких независимых уровней (барьеров) для предотвращения выхода радиоактивных веществ в окружающую среду.

Эта многоуровневая защита включает создание и удержание барьеров.

Первый уровень — это сама конструкция. Используются топливные таблетки, герметичные оболочки ТВЭЛов, прочный корпус реактора и контайнмент (защитная оболочка), способные выдерживать колоссальные внутренние и внешние нагрузки.

Второй уровень — это оборудование, обеспечивающее штатную, безаварийную работу станции, включая системы охлаждения и контроля.

Третий и четвёртый уровни — это активные и пассивные системы, которые срабатывают при возникновении аварийных ситуаций. Они обеспечивают аварийный останов реактора и отвод остаточного тепла, даже в случае полной потери электроснабжения на станции (пассивная безопасность).

Пятый уровень включает планы действий персонала и автоматизированные системы для управления даже запроектными авариями с целью минимизации последствий.

Ключевым элементом обеспечения безопасности является культура безопасности — осознанная ответственность каждого сотрудника, от оператора до руководителя, за безукоризненное выполнение своих обязанностей. Эта культура подкрепляется постоянным анализом опыта эксплуатации, моделированием аварийных режимов и регулярными противоаварийными тренировками. Таким образом, безопасность АЭС — это комплексный подход, где передовые инженерные решения сочетаются с высочайшей квалификацией и ответственностью персонала.

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Институт тепловой и атомной энергетики
Кафедра атомных электрических станций

Выпускная квалификационная работа **на тему:**

Расчет парогенератора для энергоблока АЭС с ВВЭР-1000. Физическая защита ядерных материалов, ядерных установок и пунктов хранения ядерных материалов

Студент: Сосунов Сергей Вячеславович

Группа: ТФ-12-21

Научный руководитель: Хвостова Марина Сергеевна

Цель и задачи



1. Расчет парогенератора ПГВ-1000У

- Тепловой расчет (расчет необходимой площади ТПП)
- Конструкторский расчет (определение массы и размеров основных составных частей ПГ)
- Гидродинамический расчет (расчет гидравлических сопротивлений и затрат мощности на их преодоление)
- Экономический расчет (определение оптимальной стоимости изготовления ПГ, с выбором оптимальной скорости)

2. Физическая защита ядерных материалов, ядерных установок и пунктов хранения ядерных материалов

Исходные данные

Наименование параметра	Значение
Тип	Горизонтальный
Теплоноситель	Вода
Давление теплоносителя, МПа	15.7
Температура теплоносителя на входе, °С	321
Температура теплоносителя на выходе, °С	291
Рабочее тело	Вода
Давление пара, МПа	6.27
Температура питательной воды, °С	220
Паропроизводительность, кг/с	408

Результаты расчетов

Величина	Единицы измерения	Значение
Тепловая мощность	МВт	750.56
Расход теплоносителя	кг/с	4476.8
Паропроизводительность	кг/с	408
Оптимальная скорость теплоносителя на входе	м/с	5.01
Площадь ТПП	м ²	6998
Число труб ТПП	шт	9996
Диаметр корпуса	м	5.06
Длина корпуса	м	20.16
Масса ПГ	т	312.5
Стоимость изготовления	млн. руб	602.5



Зависимость приведенных затрат от скорости теплоносителя



Величина, размерность	Значение				
Скорость теплоносителя на входе, м/с	3.51	4.01	4.51	5.01	5.51
Капитальная составляющая приведенных затрат, млн руб/год	222.9	179.8	151.9	130.7	116.9
Затраты на электроэнергию млн руб/год	33.3	49.7	64.6	84	111.3
Приведенные затраты, млн руб/год	256.2	229.6	216.5	214.7	228.2

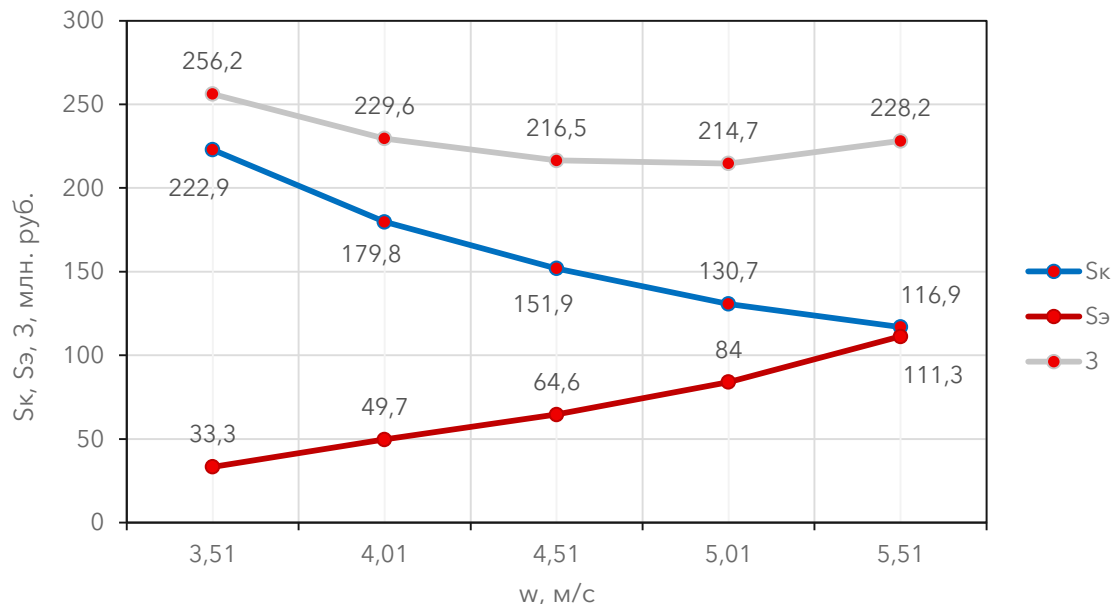


Рисунок 1- График зависимостей:

S_k – зависимость капитальной составляющей затрат от скорости теплоносителя

S_e - зависимость затрат на электроэнергию от скорости теплоносителя

Z – зависимость приведенных затрат от скорости теплоносителя

Физическая защита ядерных материалов, ядерных установок и пунктов хранения ядерных материалов



Цель исследования – анализ существующих мер физической безопасности ПКС НИУ «МЭИ», анализ документации ПКС и формулирование рекомендаций по улучшению. Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи:

- обзор нормативно-правовой документации;
- изучить применяемые современные методы обеспечения физической безопасности;
- выявить основные угрозы и уязвимости, связанные с физической безопасностью;
- анализ документации ПКС НИУ «МЭИ».

Физическая защита. Задачи



Физическая защита ядерных объектов включает в себя комплекс мер, направленных на предотвращение несанкционированного доступа, саботажа, кражи радиоактивных материалов и других угроз. Эти меры включают использование физических барьеров, систем контроля доступа, видеонаблюдения, охранных систем и других технических средств. Важную роль играют также организационные меры, такие как обучение персонала, проведение регулярных проверок и тренировок.

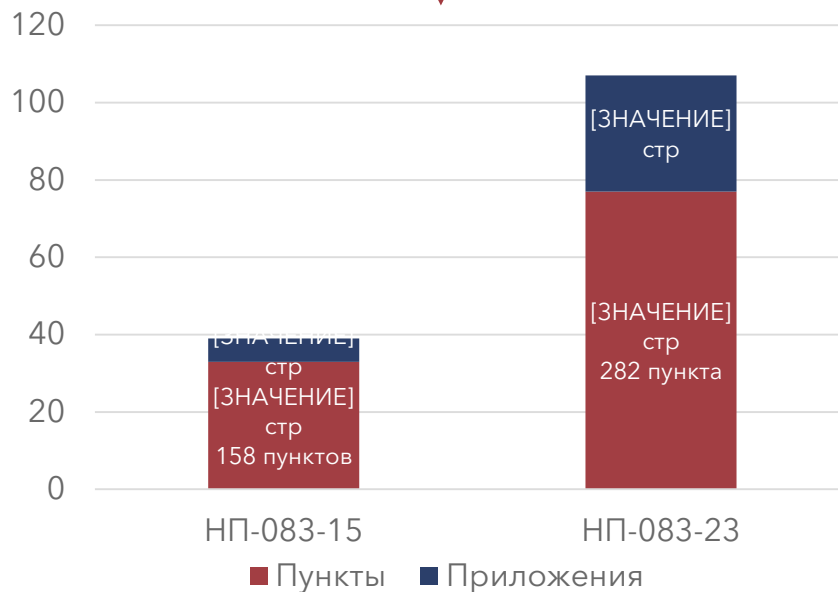
Одним из ключевых аспектов физической защиты является интеграция различных систем и технологий в единую комплексную систему безопасности. Это позволяет обеспечить более высокий уровень защиты и оперативно реагировать на возникающие угрозы.

Обзор нововведений НП-083-15 / НП-083-23

По области
применения

Уточнена
применимость,
введены
исключения
(ВПК)

По
структуре



Требования
к системе

Введен показатель
«эффективности»,
установлены его
минимально
допустимые
значения к каждой
системе

Обзор нововведений НП-083-15 / НП-083-23



Категорирование

Учитывается возможность повышения категории при наличии нескольких предметов

Требования к персоналу

Появились требования к подготовке, повышению квалификации и формированию культуры защиты

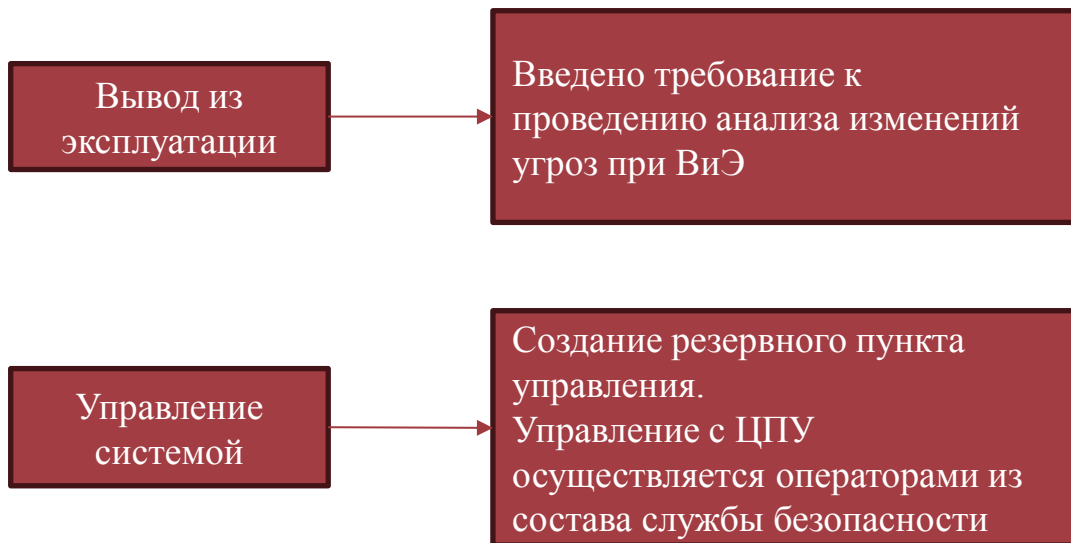
Требования к ИТС

Требования к системам обнаружения запрещенных к проносу предметов, систем сбора, обработки и отображения информации

Анализ уязвимостей

Теперь проводится даже при изменении категории предмета физ. защиты (ранее при создании)

Обзор нововведений НП-083-15 / НП-083-23

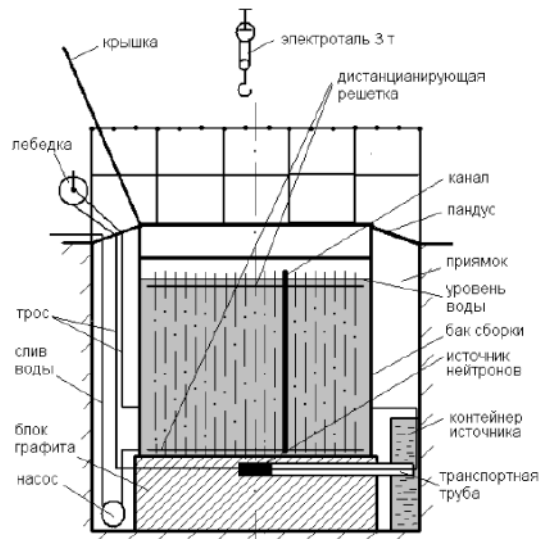


Подытоживая, отметим, что редакция НП-083 внесла детализацию требований к системам физической защиты, а так же внесла новые требования усиливающие безопасность.

Уран-водный подкритический стенд (ПКС) предназначен и используется для изучения нейтронно-физических процессов в подкритических системах с водным замедлителем и урановым топливом.

Стенд состоит из:

- помещения уран-водной подкритической сборки;
- хранилища ядерных материалов;
- раздевалки;
- мастерской;
- помещения для персонала;



Подкритическая уран-водная сборка
(схема и фотография)

Элементы физической защиты ПКС НИУ «МЭИ»



Спираль Бруно



Кнопка вызова
Росгвардии и ПУ



Видеонаблюдение



Оконная решетка



IV категория объекта, представлены предметы физической защиты категории Д

Рекомендации к доработке ООБ ПКС НИУ «МЭИ»



Категория	Требуемая правка
Организационные меры	Детализировать взаимодействие ЦКОП с правоохранительными органами и спецслужбами
Процедуры и инструкции	Описать процедуры проверки и тестирования систем физической защиты
Персонал	Добавить информацию о программе подготовки и профилактических мероприятиях персонала
Отчетность	Внести информацию по инцидентам с физической защитой (если таковые имеются)



Спасибо за внимание!

ГИДРОДИНАМИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ: фундамент безопасности и эффективности атомной энергетики

Экспериментальная и вычислительная гидродинамика: фундамент безопасности и эффективности атомной энергетики.

Атомная электростанция — это самый сложный комплекс, где в замкнутом объёме происходят интенсивные процессы тепло- и массообмена. Вода или жидкий металл, циркулируя через активную зону реактора, отводят колоссальное количество тепла, выделяемого в результате цепной реакции. Понимание и точное описание поведения этих теплоносителей является ключом к проектированию надёжных, эффективных и, что самое главное, безопасных атомных энергоустановок. Именно здесь на передний план выходят экспериментальная и вычислительная гидродинамика.

Важность тематики для атомной отрасли

Экспериментальная гидродинамика позволяет получить фундаментальные данные о поведении теплоносителя в реальных или модельных условиях. С помощью сложных лабораторных стендов, оснащённых современными измерительными системами (PIV, LDV),

исследователи изучают структуру течений, пульсации давления, процессы кипения и теплоотдачу от тепловыделяющих элементов. Эти данные служат неопровержимой физической базой для любых теоретических моделей.

Вычислительная гидродинамика (CFD), в свою очередь, является мощным инструментом моделирования. Она позволяет «заглянуть» внутрь работающего реактора, визуализировать трёхмерные поля скоростей, температур и давлений в элементах, недоступных для прямого измерения.

Будущее CFD связано с применением методов машинного обучения и искусственного интеллекта для ускорения расчётов, создания гибридных моделей и более точной обработки экспериментальных данных.

Работы бакалавров в области экспериментальной и вычислительной гидродинамики — это не просто академические исследования. Это прямой вклад в создание энергетических технологий нового поколения, которые обеспечат энергетическую независимость и устойчивое развитие страны на десятилетия вперёд.

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное общеобразовательное учреждение
высшего образования
Национальный исследовательский университет
«Московский энергетический институт»
Кафедра «Атомные электрические станции»

ПРЕЗЕНТАЦИЯ К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ
на тему: «**Моделирование транспорта газовой фазы в реакторе
атомного ледокола КЛТ-40**»

Специальность: 14.03.01 - Ядерная энергетика и теплофизика

Выполнил: студент группы ТФ-11-21 Сафронов М.Е.

подпись: _____

Научный руководитель: доцент, к.т.н. Воробьев Ю.Б.

подпись: _____



Актуальность работы: наличие растворенных газов в теплоносителе и возможность их дегазации при недогретом кипении на выходе активной зоны являются фактором возникновения очаговой коррозии циркониевых элементов активной зоны а также представляют опасность их негативного воздействия на оборудование первого контура

Цель работы: моделирование транспорта газовой фазы в реакторе КЛТ-40 и проведение анализа накопления нерастворенных газов в объеме корпуса реактора

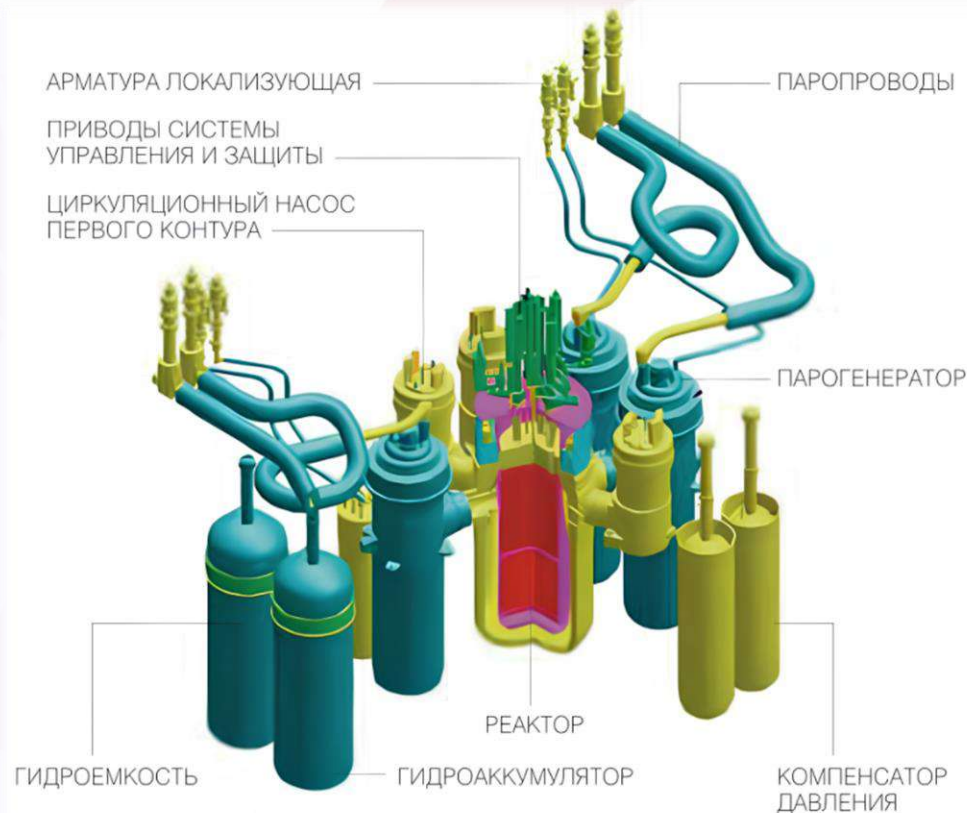
Задачи:

- 1) изучение конструкции РУ КЛТ-40;
- 2) изучение теплофизических параметров теплоносителя на номинальном уровне мощности;
- 3) создание геометрической модели сектора реактора;
- 4) выбор и создание расчетной сетки;
- 5) определение параметров расчетной модели;
- 6) задание начальных и граничных условий для групп поверхностей;
- 7) проведение расчета;
- 8) анализ результатов моделирования.

Компоновка реакторной установки КЛТ-40

Особенности и состав РУ:

- тип ВВЭР
- модульная компоновка
- 4 вертикальных парогенератора
- 4 двухскоростных ЦНПК
- 2 вертикальных, газовых компенсатора давления
- 2 гидроемкости САОЗ



Геометрическая модель сектора реактора КЛТ-40



Рис. 2 - теплогидравлическая схема на основе интегрального кода Relap5

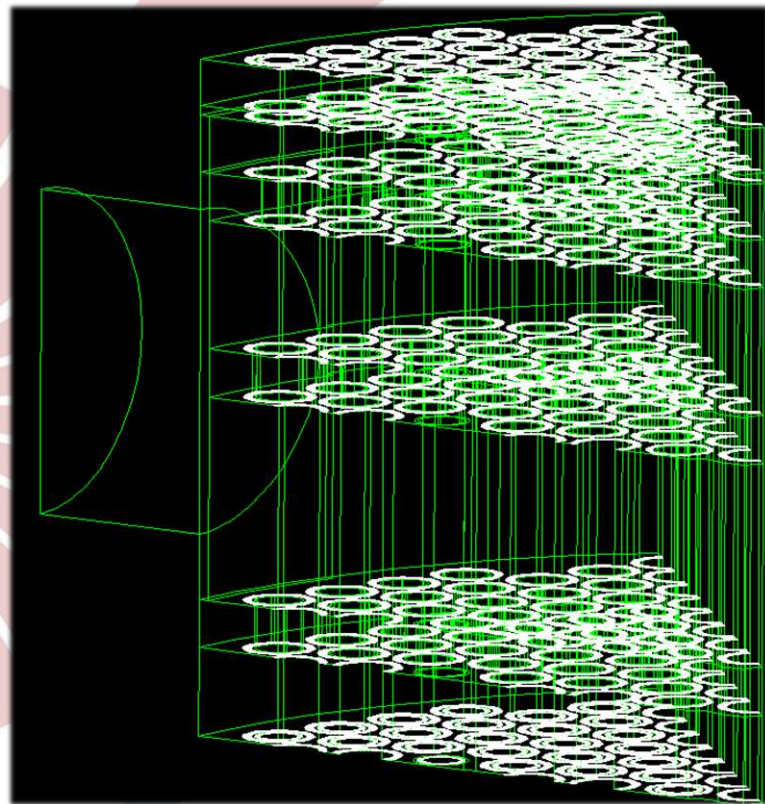


Рис. 3 - геометрическая модель Gambit

Первоначальная расчетная сетка:

- тип TGRID
- размер ячейки 0,008 м
- количество элементов 2281452

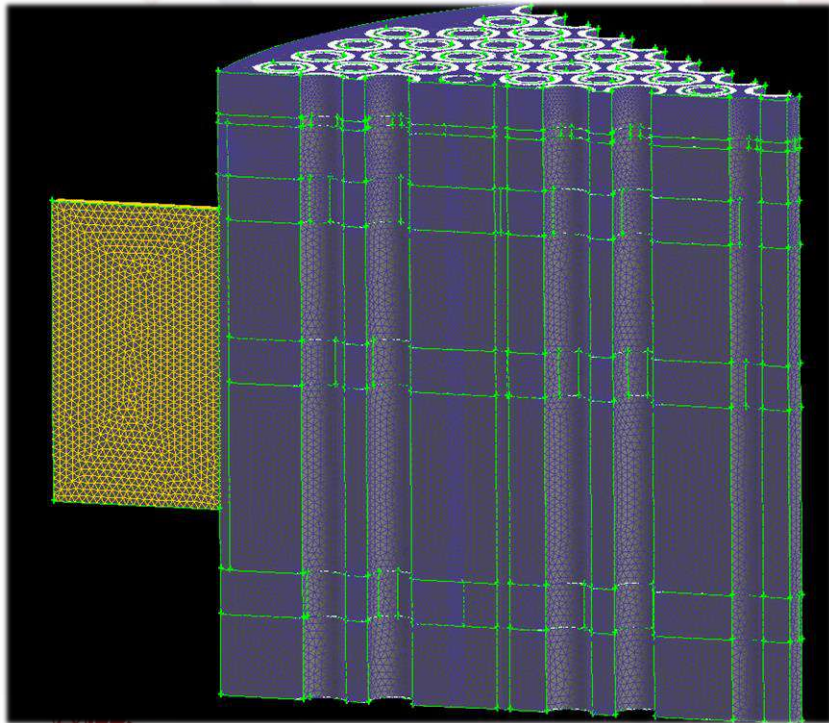


Рис. 4 - расчетная сетка модели

Уточненная расчетная сетка:

- тип TGRID
- размер ячейки 0,004 м
- количество элементов 7130043

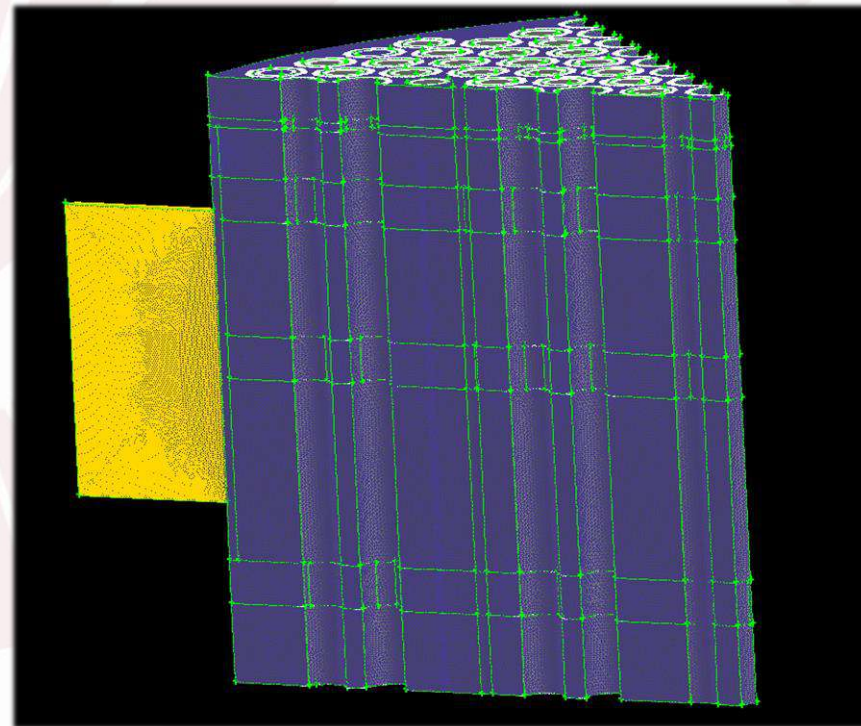


Рис. 5 - уточненная расчетная сетка

Моделирование течения теплоносителя в стационарном режиме

Таблица 1 - параметры моделирования

Параметр	Значение
Режим работы реактора	номинальный
Среда	вода
Модель турбулентности	Shear Stress Transport
Перенос теплоты	изотермическая модель
Тип анализа	Steady State
Давление	12,7 МПа
Температура	316 °C

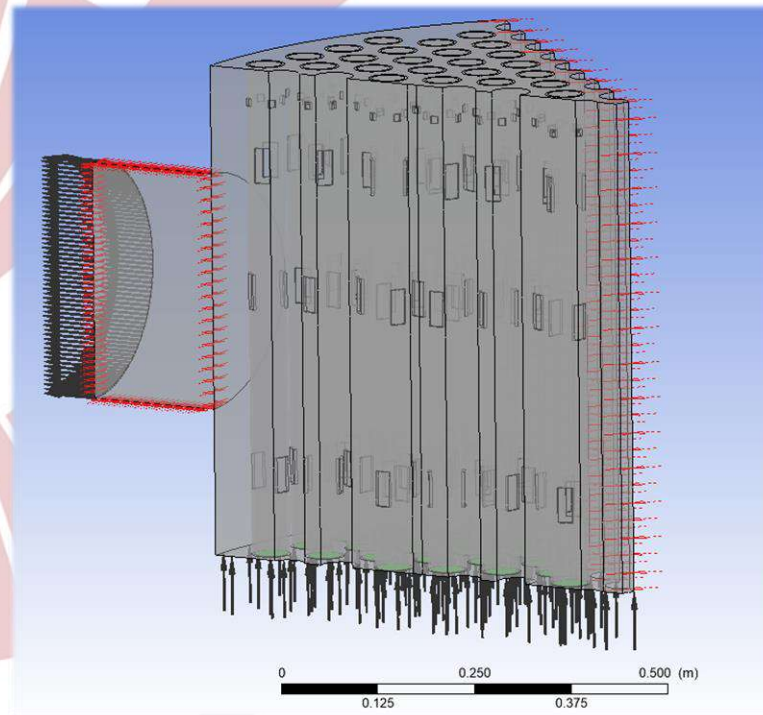


Рис. 6 - модель в Ansys CFX Pre

Распределение параметра y^+ первоначальной расчетной сетки

Таблица 2 - значения y^+

поверхность	Значение y^+		
	минимальное	максимальное	среднее значение
Внешняя стенка каналов	0,04	502	102
Внутренняя стенка каналов	0,6	535	255
Выходной патрубков	74	719	383
Задняя стенка	17	814	201
Верхняя стенка	1	178	44
Боковые стенки	1	323	108

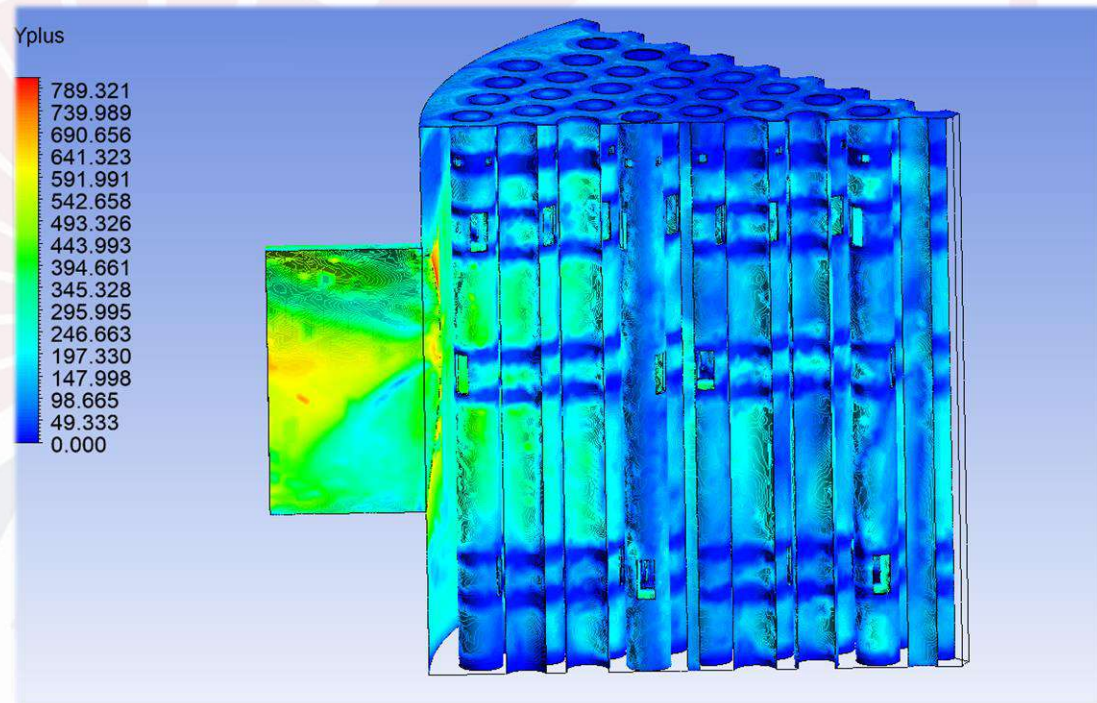


Рис. 7 - распределение y^+ по поверхностям модели

Распределение параметра y^+ уточненной расчетной сетки

Таблица 3 - значения y^+

поверхность	Значение y^+		
	мини- мальное	макси- мальное	среднее значение
Внешняя стенка каналов	1	351	86
Внутренняя стенка каналов	1	371	146
Выходной патрубок	11	306	120
Задняя стенка	7	358	118
Верхняя стенка	2	229	86
Боковые стенки	2	311	79

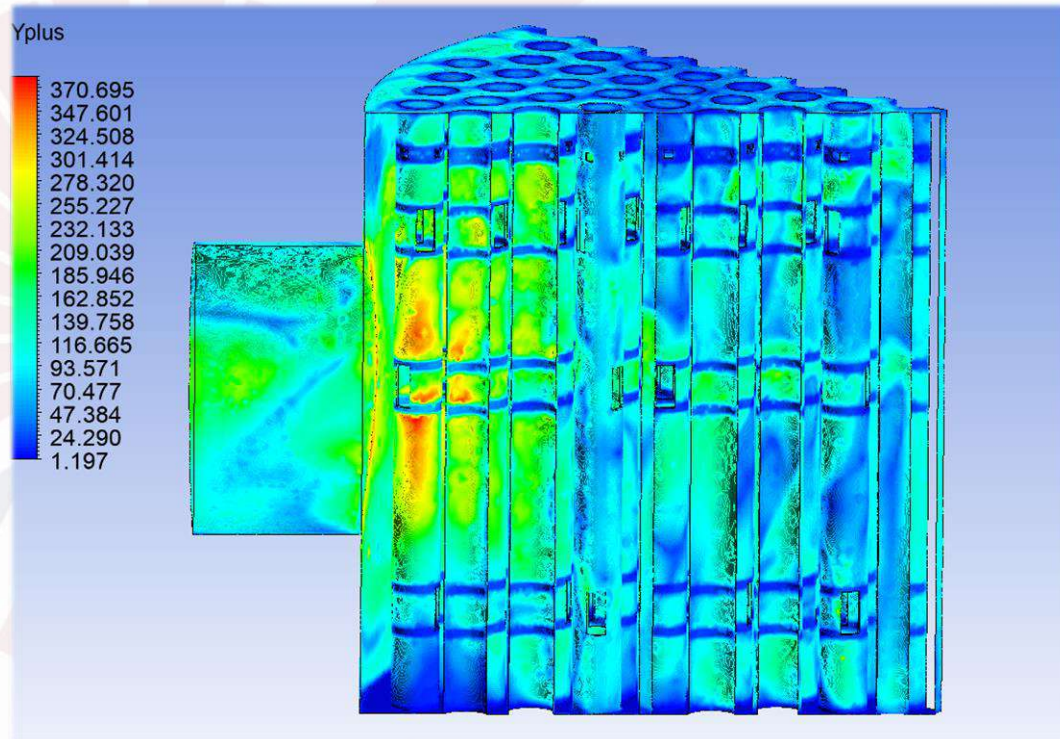


Рис. 8 - распределение y^+ по поверхностям модели

Анализ результатов стационарного расчета течения водного теплоносителя

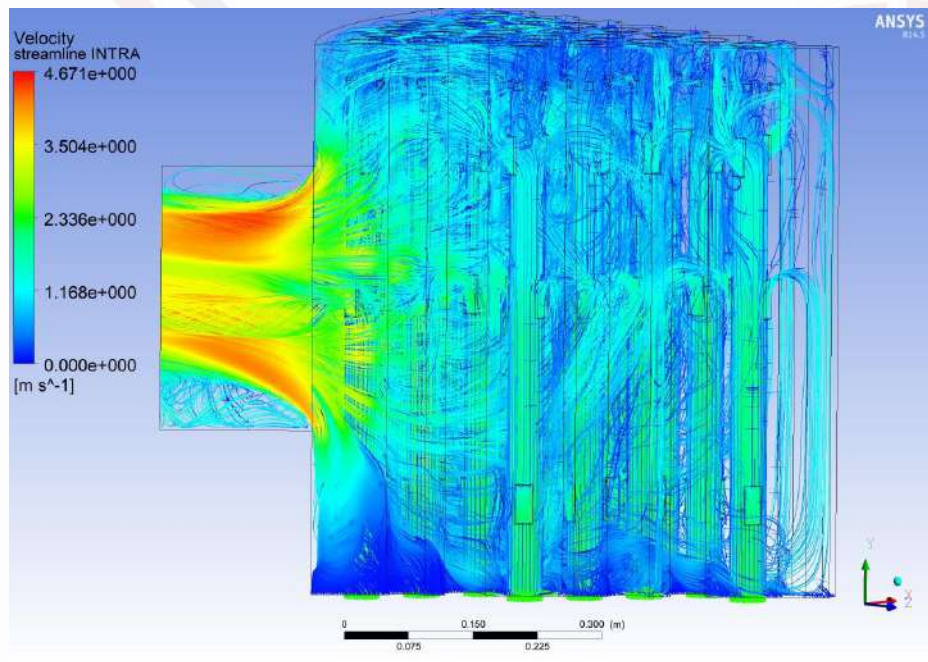


Рис. 9 - линии тока теплоносителя

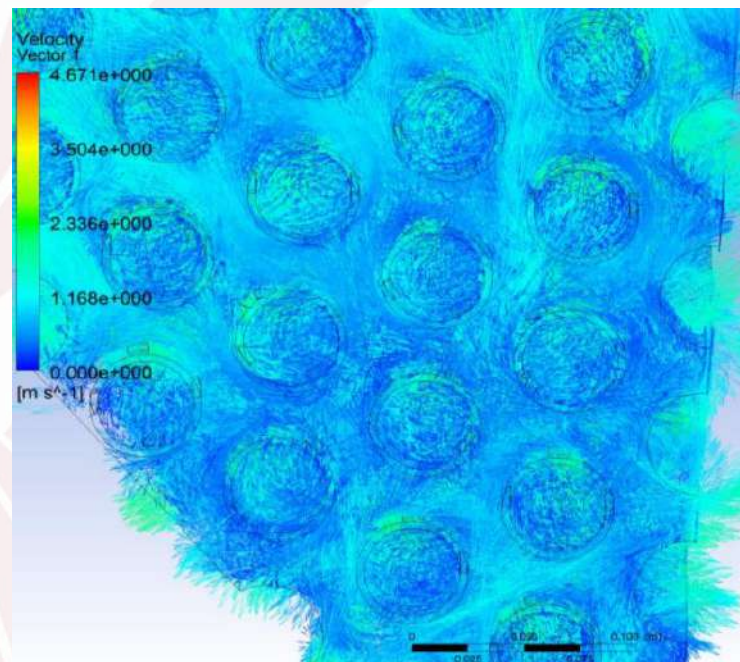
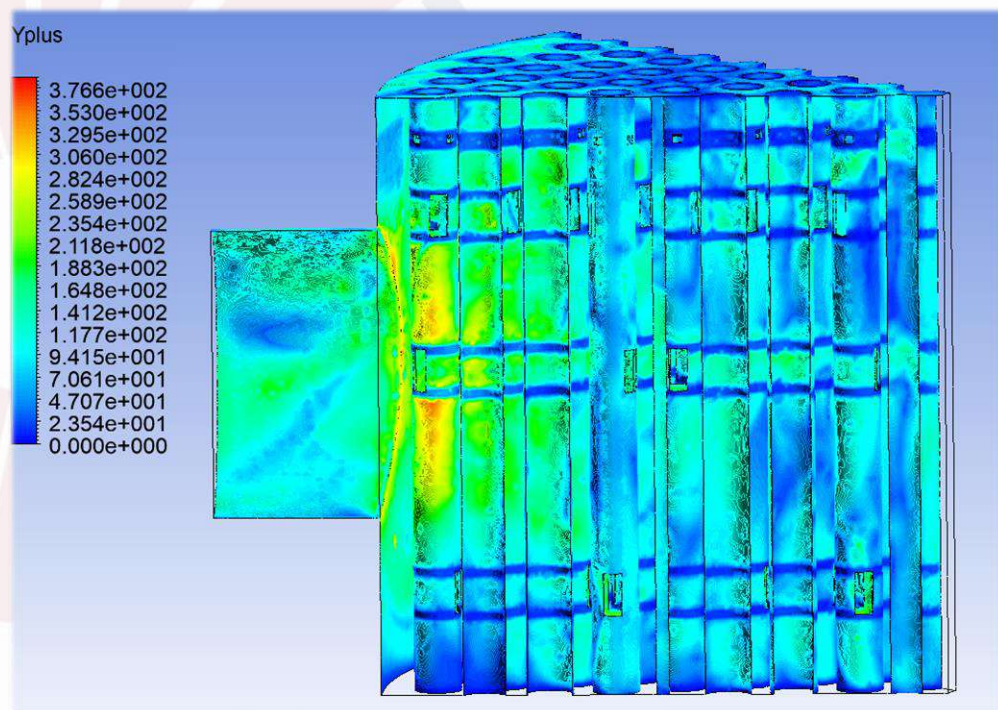


Рис. 10 - векторное поле скорости

Нестационарный расчет течения теплоносителя в виде воды и полидисперсной газовой фазы

Таблица 4 - параметры моделирования

Параметр	Значение
Режим работы реактора	номинальный
Среда	вода, газовая смесь азота и водорода в соотношении 83,48% и 16,52% соответственно
Модель турбулентности	Shear Stress Transport
Перенос теплоты	изотермическая модель
Давление	12,7 МПа
Температура	316 °С
Объемное содержание газовой фазы	1,22836 %
Смоделированное время процесса	75 с



Анализ результатов нестационарного расчета течения водного теплоносителя

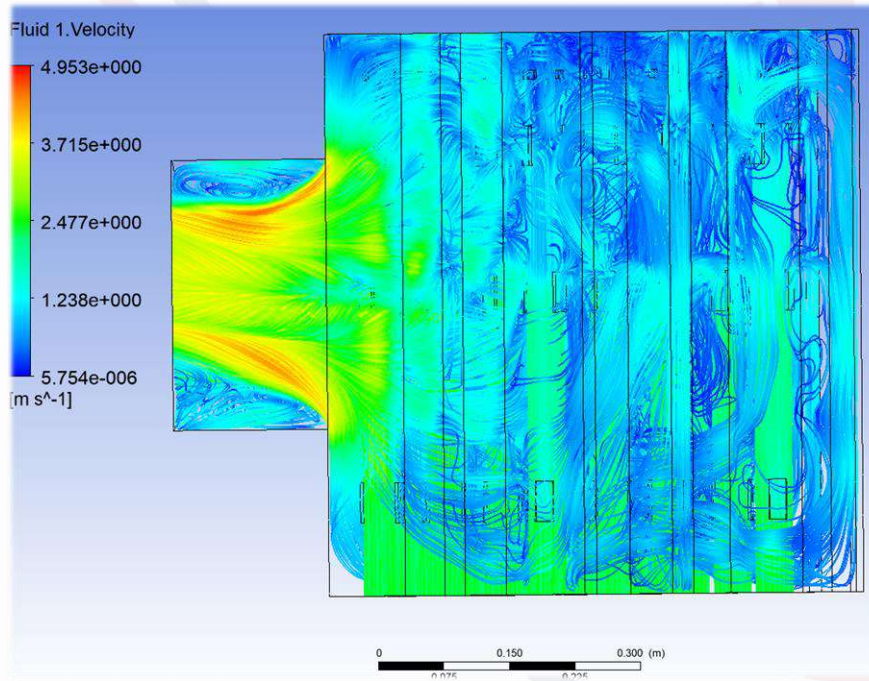


Рис. 12 - линии тока теплоносителя
(вид спереди)

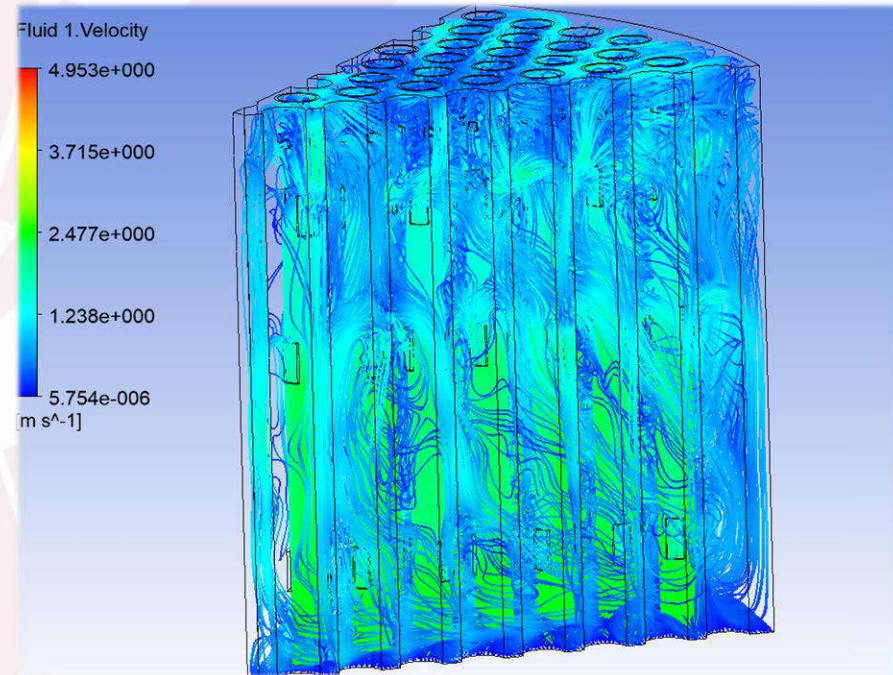


Рис. 13 - линии тока теплоносителя
(произвольный вид)

Анализ объемной доли газовой фазы первого промежуточного результата моделирования

Таблица 5 - значения объемной доли газовой фазы

Поверхность	Объёмная доля газовой фазы, %		
	Минимальная	Максимальная	Средняя по поверхности
№1	0,68145	2,46149	1,20033
№2	0,93283	1,84649	1,25942
№3	0,92418	2,54174	1,22745
№4	0,76782	2,19175	1,17041
№5	0,63269	11,8464	1,16553

*Полученные результаты расчета относятся к моменту времени 10 с

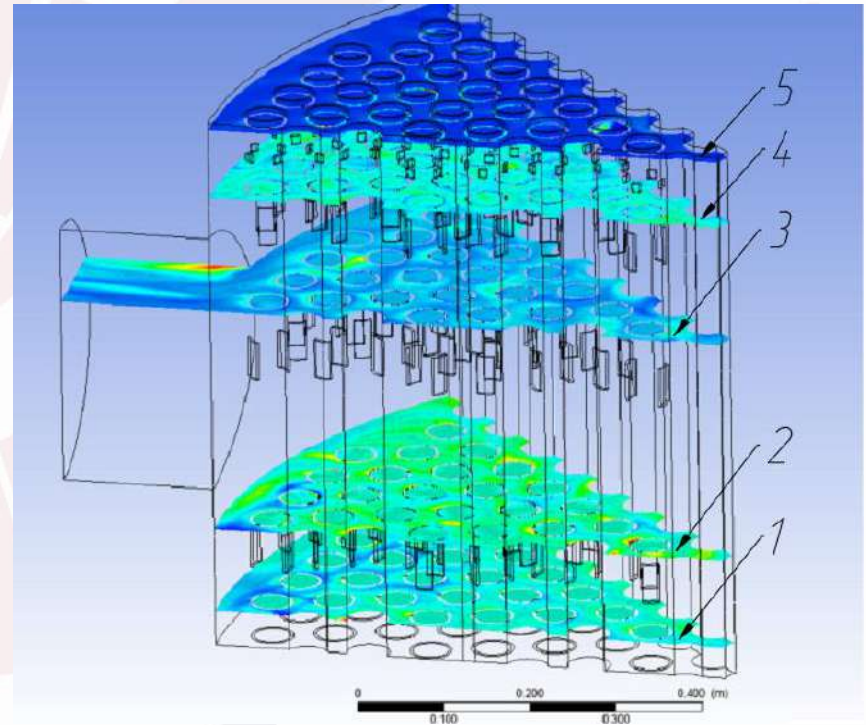


Рис. 14 - распределение объемной доли газовой фазы по вспомогательным поверхностям

Анализ объемной доли газовой фазы первого промежуточного результата моделирования

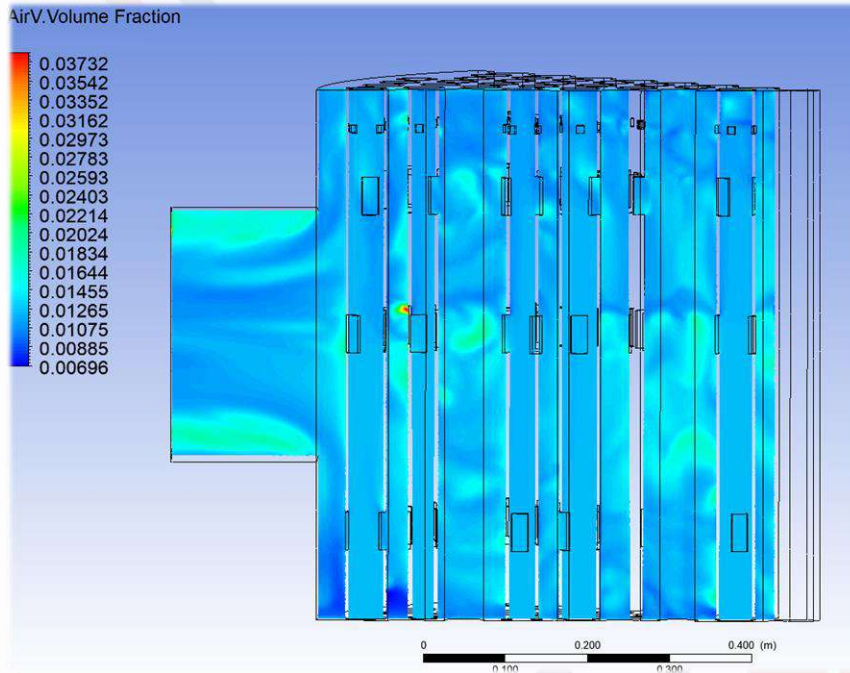


Рис. 15 - распределение объемной доли газовой фазы по высоте модели

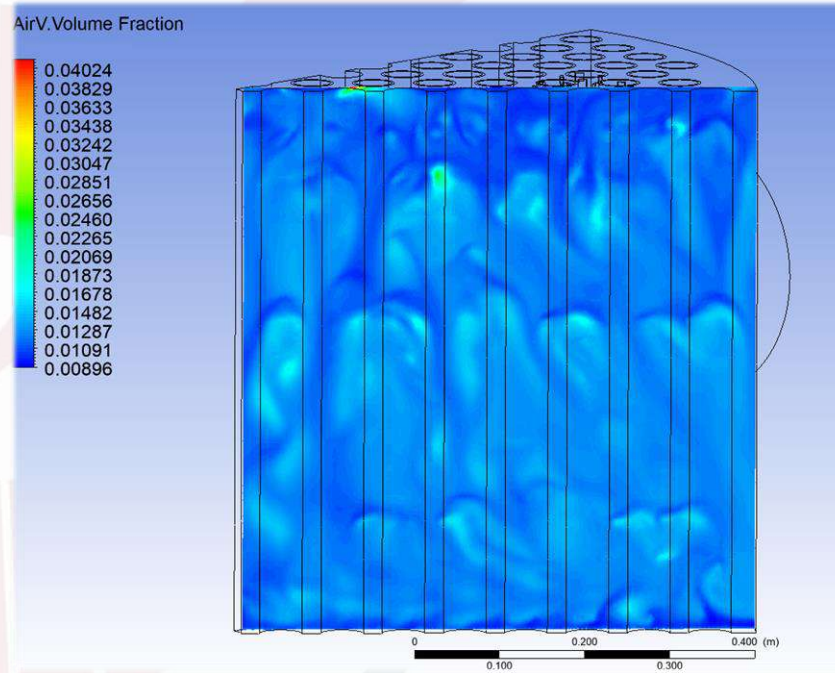


Рис. 16 - распределение объемной доли газовой фазы по высоте модели

Распределение объемной доли газовой фазы в надзонном пространстве в первом промежуточном результате расчета

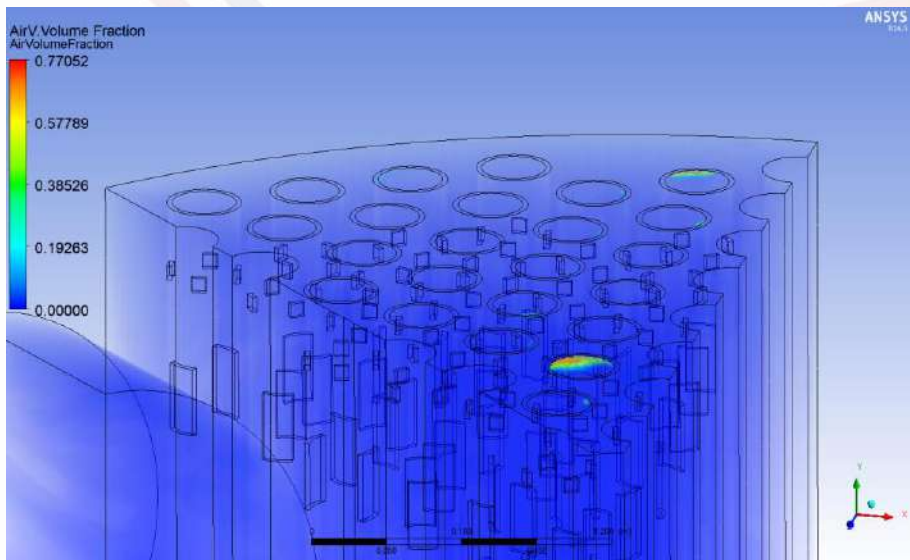


Рис. 17 - Распределение объемной доли газовой фазы в секторе реактора

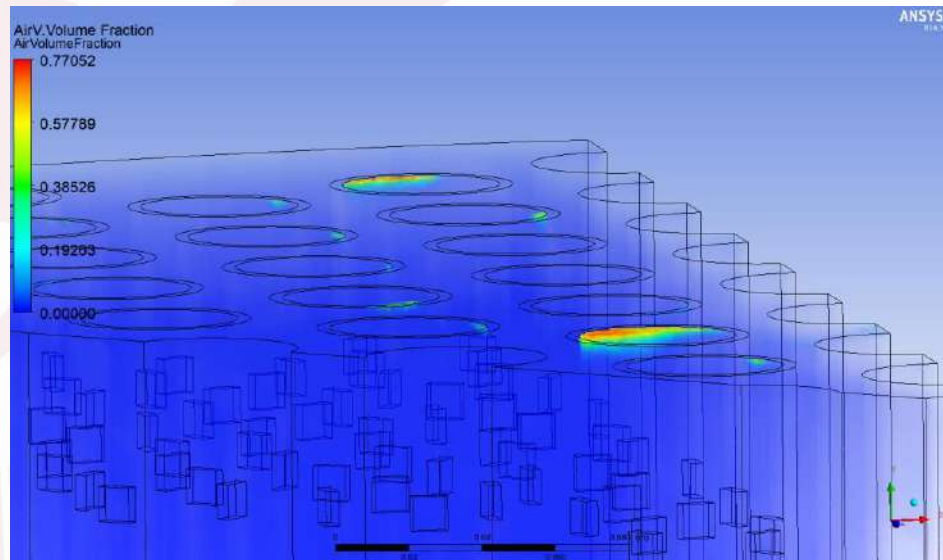


Рис. 18 - Распределение объемной доли газовой фазы в секторе реактора (увеличенный масштаб)

Анализ заключительного результата моделирования

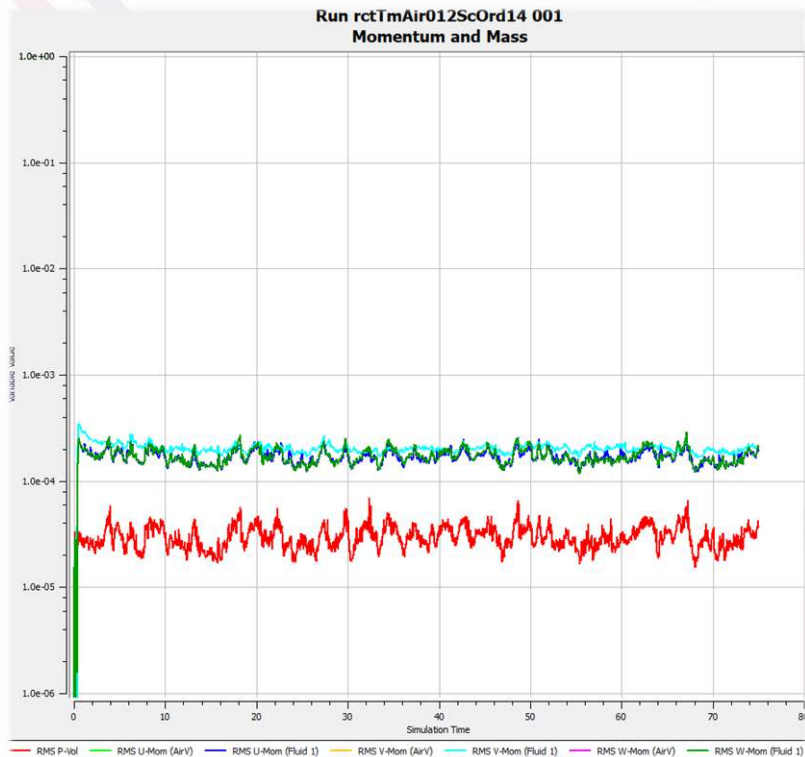


Рис. 19 - Зависимость параметра RMS от времени

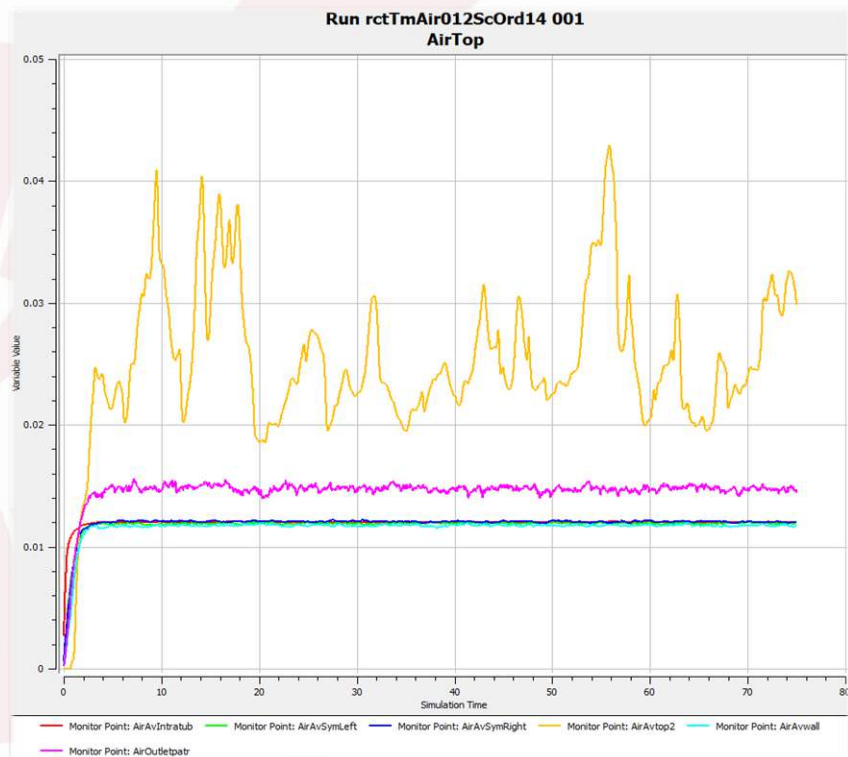


Рис. 20 - Зависимость объемной доли газовой фазы на поверхностях модели от времени

Анализ объемной доли газовой фазы заключительного результата моделирования

Таблица 6 - объемная доля газовой фазы

Поверхность	Объемная доля газовой фазы, %		
	Минимальная	Максимальная	Средняя по поверхности
№1	0,71170	2,15935	1,20471
№2	0,96256	1,99113	1,26364
№3	0,89986	3,11286	1,22809
№4	0,74167	2,21808	1,16975
№5	0,71135	5,32685	1,16664

*Полученные результаты расчета относятся к моменту времени 75 с

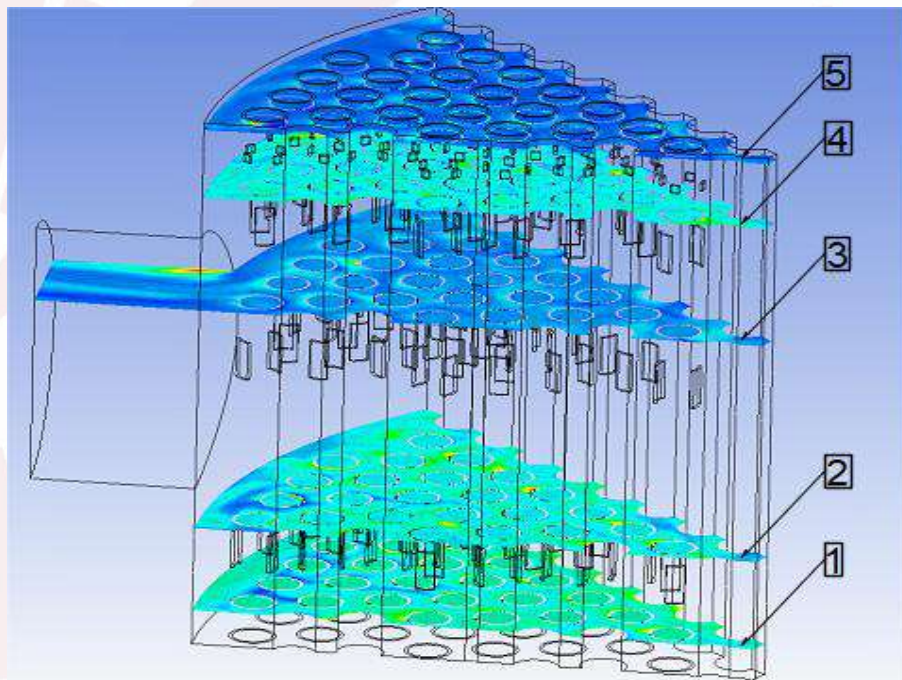


Рис. 21 - распределение объемной доли газовой фазы по вспомогательным поверхностям

Анализ объемной доли газовой фазы заключительного результата моделирования

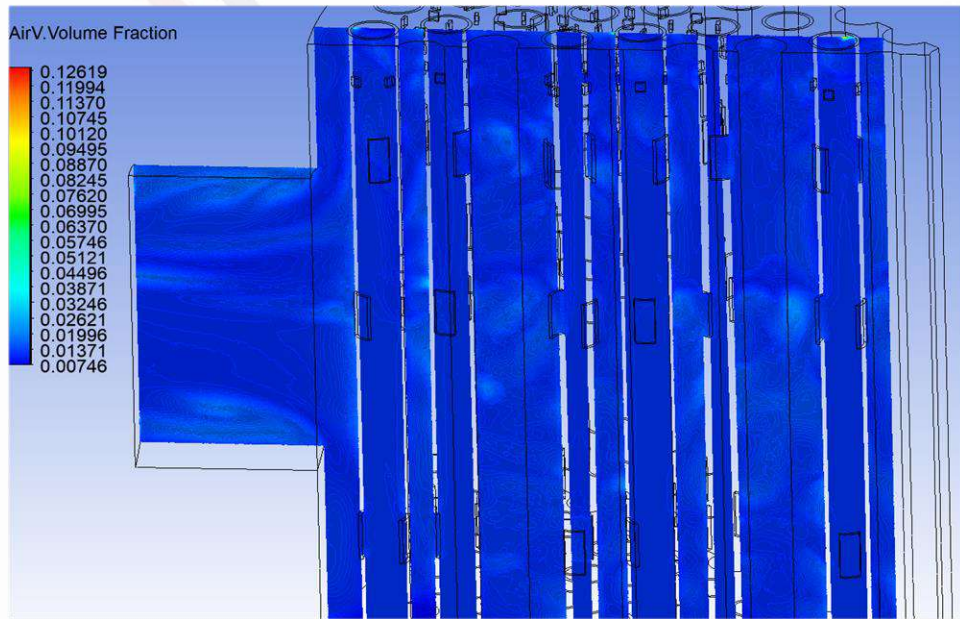


Рис. 22 - распределение объемной доли газовой фазы по высоте модели

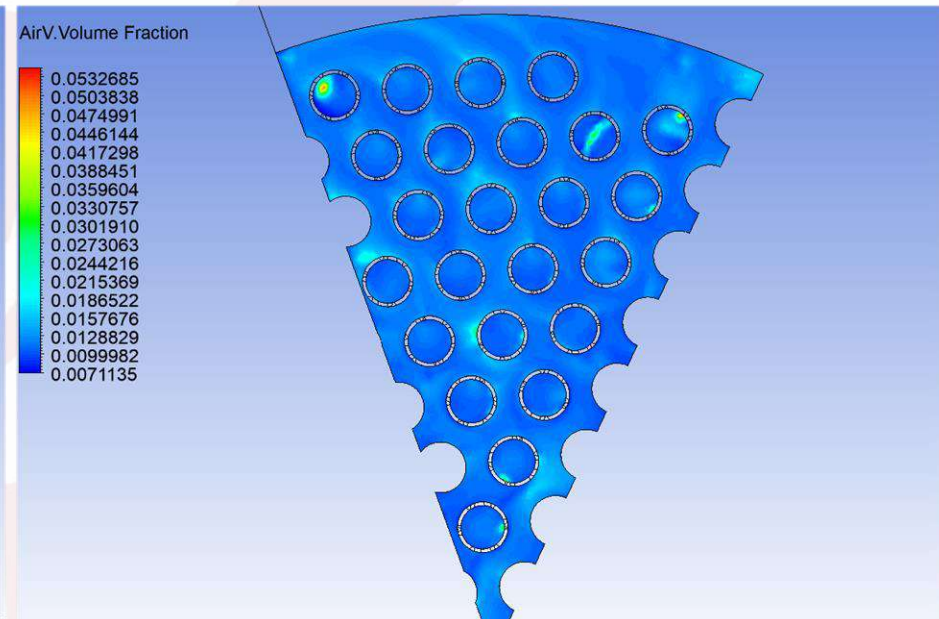


Рис. 23 - распределение объемной доли газовой фазы по поверхности №5

Анализ распределения объемной доли газовой фазы заключительного результата моделирования

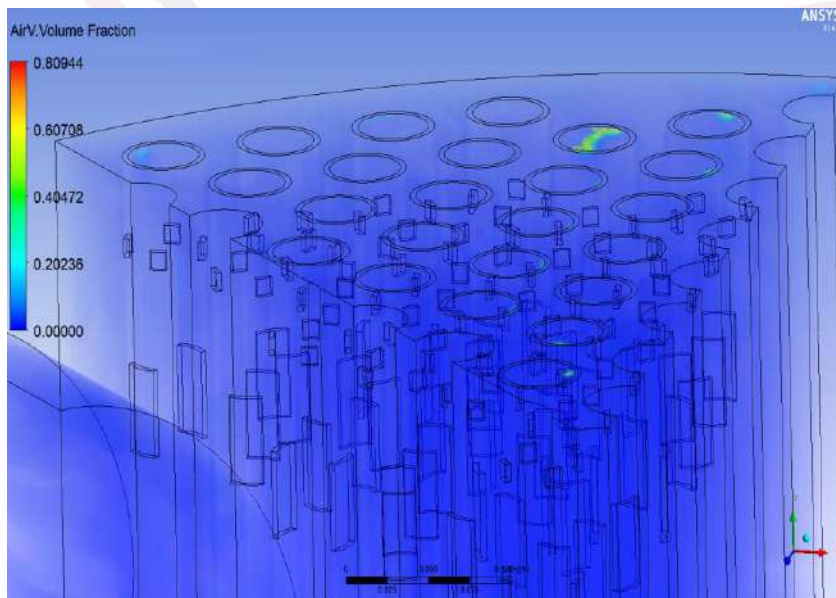


Рис. 24 - Распределение объемной доли газовой фазы в секторе реактора

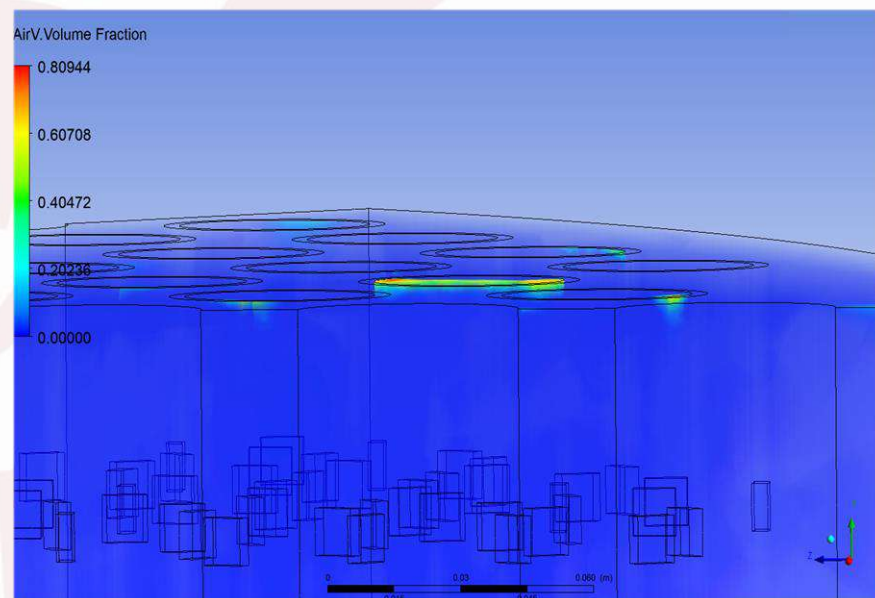


Рис. 25 - Распределение объемной доли газовой фазы в секторе реактора (увеличенный масштаб)

Сопоставление областей вихревых структур с зонами повышенного содержания газовой фазы

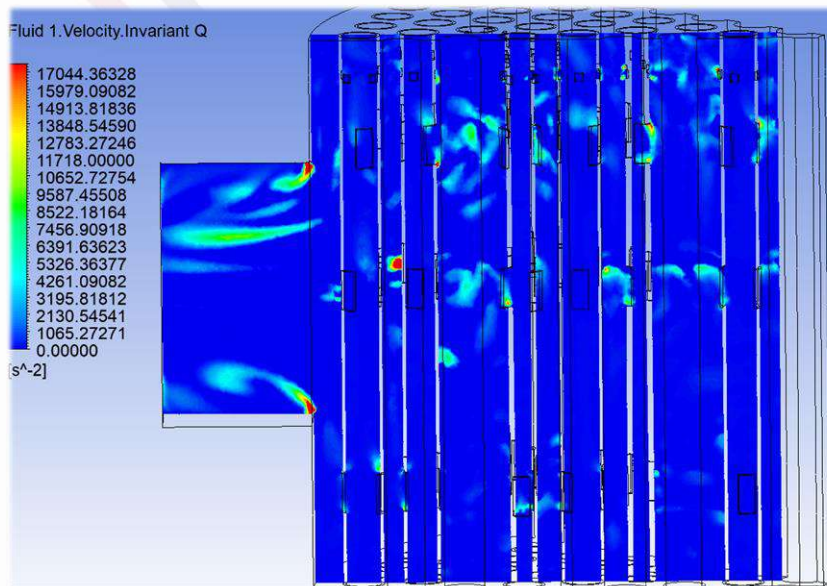


Рис. 26 - распределение Q-инварианта по высоте модели

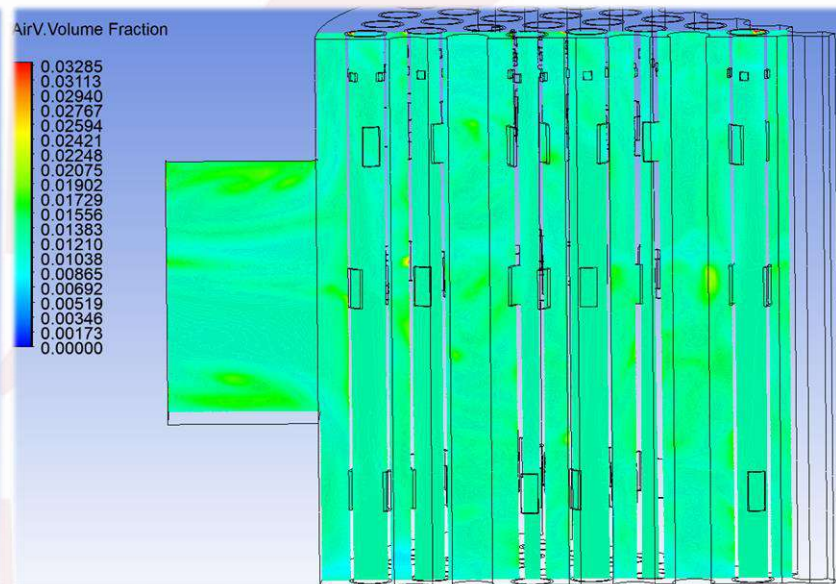


Рис. 27 - распределение объемной доли газовой фазы по высоте модели

Сопоставление областей вихревых структур с зонами повышенного содержания газовой фазы

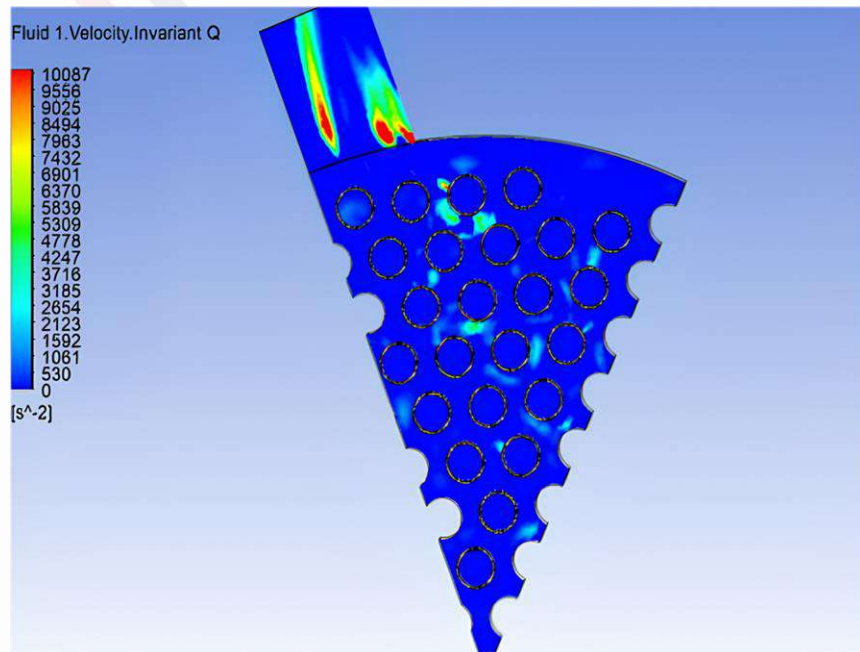


Рис. 28 - распределение Q-инварианта по плоскости №3

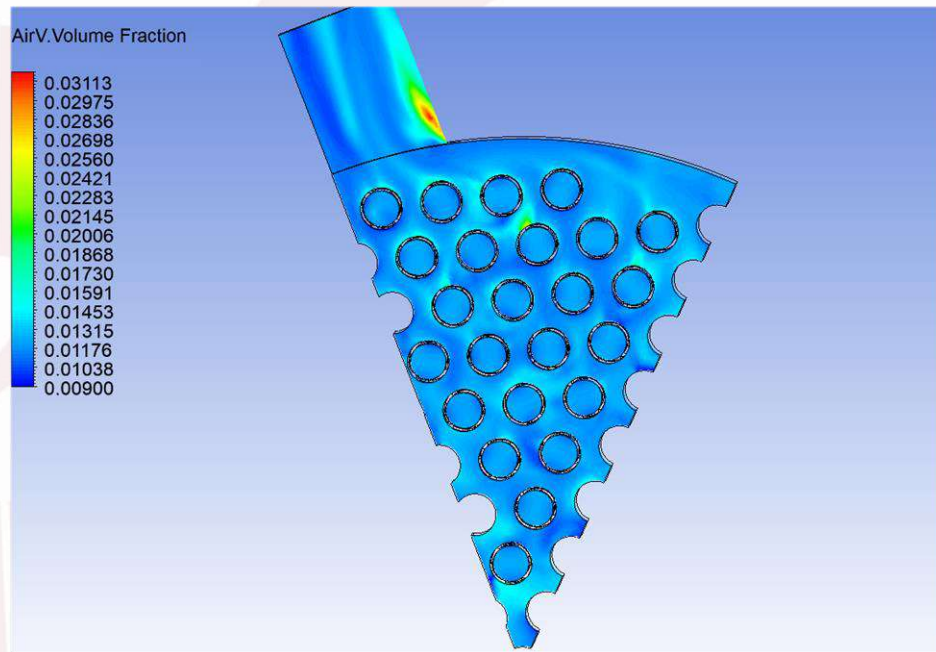


Рис. 29 - распределение объемной доли газовой фазы по плоскости №3

Сравнительный анализ результатов моделирования

Таблица 7 - объемная доля газовой фазы в момент времени 10 с

Поверх-ность	Объемная доля газовой фазы, %			
	Макси-мальная	Средняя по поверхности	Макси-мальная в объеме	Средняя по объему
№1	2,46149	1,20033	77,0521	1,24777
№2	1,84649	1,25942		
№3	2,54174	1,22745		
№4	2,19175	1,17041		
№5	11,8464	1,16553		

Таблица 8 - объемная доля газовой фазы в момент времени 75 с

Поверх-ность	Объемная доля газовой фазы, %			
	Макси-мальная	Средняя по поверхности	Макси-мальная в объеме	Средняя по объему
№1	2,15935	1,20471	80,9439	1,24747
№2	1,99113	1,26364		
№3	3,11286	1,22809		
№4	2,21808	1,16975		
№5	5,32685	1,16664		

Заключение

В ходе выполнения дипломной работы были достигнуты следующие результаты:

- Освоено программное обеспечение Gambit и Ansys CFX, позволяющее проводить моделирование гидродинамических и тепломассообменных процессов;
- Разработана трёхмерная геометрическая модель сектора реактора КЛТ-40;
- В результате анализа результатов моделирования выявлены зоны образования вихревых потоков и участки с пониженной скоростью течения;
- Обнаружены локальные области повышенного содержания газовой фазы теплоносителя — преимущественно под верхней стенкой модели и в зонах формирования вихревых структур;
- Сравнение средней и максимальной объемной доли газовой фазы по объёму модели и по вспомогательным поверхностям не выявило значительного накопления нерастворённых газов в рамках принятых допущений.

Полученные результаты определяют актуальность уточнения расчётной сетки в пристеночных областях, проведения моделирования для большего значения времени работы реактора и определения поля коэффициента массоотдачи, с целью получения более точного анализа транспорта газовой фазы в РУ КЛТ-40

Спасибо за внимание!





Исследование двухфазной гидродинамики около погружённого дырчатого листа

Студент: Городецкая Т.С.

Группа ТФ-11-21

Научный руководитель: Мелихов О.И.

Консультант: Токарев С.А.



Москва 2025

Актуальность работы

Ключевой параметр – ВЛАЖНОСТЬ!

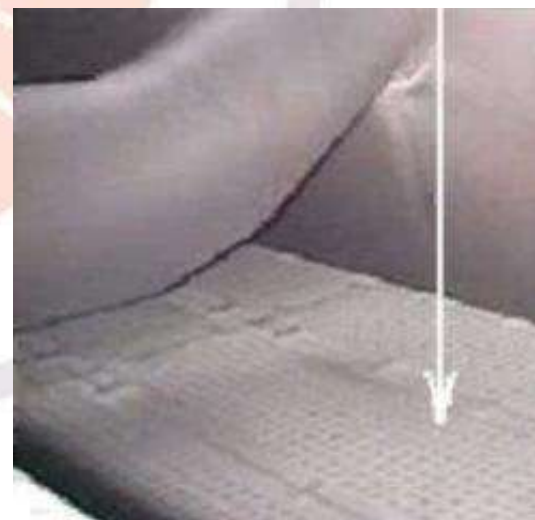
Истоки проблемы

Чтобы обеспечить требуемое значение влажности используется гравитационная схема сепарации, НО!

В парогенераторе пар образуется неравномерно поэтому эффективность гравитационной сепарации понижается

Поэтому используется погружённый дырчатый лист

- обладает высоким коэффициентом гидравлического сопротивления и выравнивает паровую нагрузку на зеркале испарения



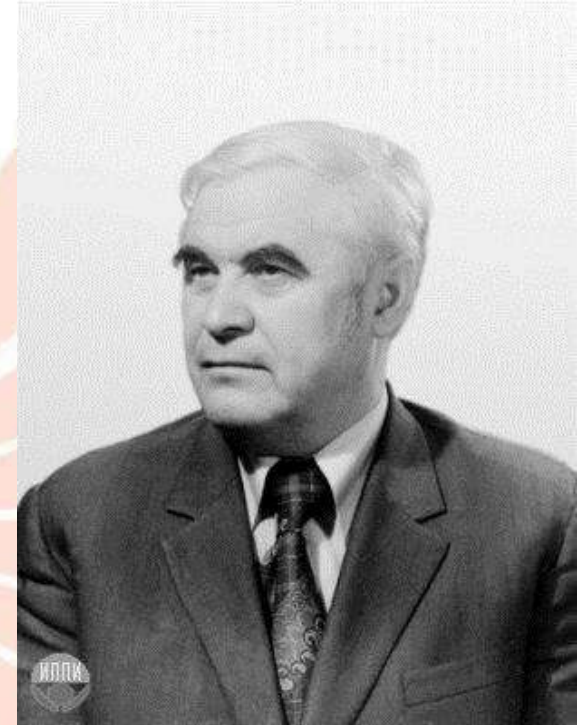
Актуальность работы

Проблема

В данный момент для расчётов влажности пара используются только полуэмпирические формулы, которые разработаны на основе экспериментальных данных – ЭТОГО НЕДОСТАТОЧНО!



Для исследования двухфазных процессов в области ПДЛ НЕОБХОДИМЫ модели гравитационной сепарации на основе численного моделирования.



Кружилин Г.Н.

Цели и задачи

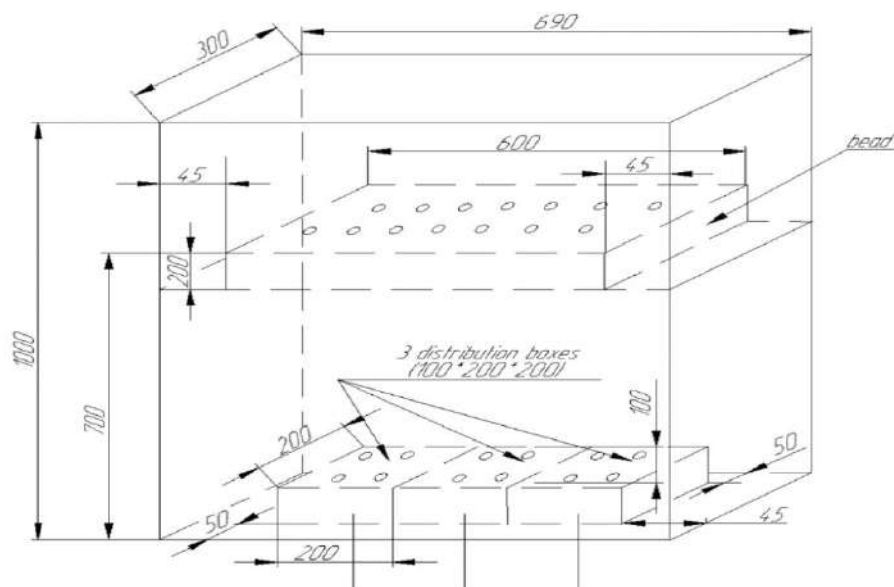
Цель

Проверка адекватности результатов моделирования гидродинамических процессов, характерных для гравитационной сепарации на экспериментальных данных для улучшения методики расчёта течения двухфазного потока вблизи погружённого дырчатого листа и усовершенствования метода сепарации пара в горизонтальном парогенераторе.

Задачи

- проведение эксперимента на установке Барботёр с расходом воздуха 30 л/мин;
- изучение метода VOF и моделирование с помощью него процесса барботажа в открытом коде OpenFOAM
- сравнение экспериментальных и численных данных

Эксперимент



Установка «Барботёр»



Общий вид установки

Рабочий участок – параллелепипед $690 \times 300 \times 1000$ мм.

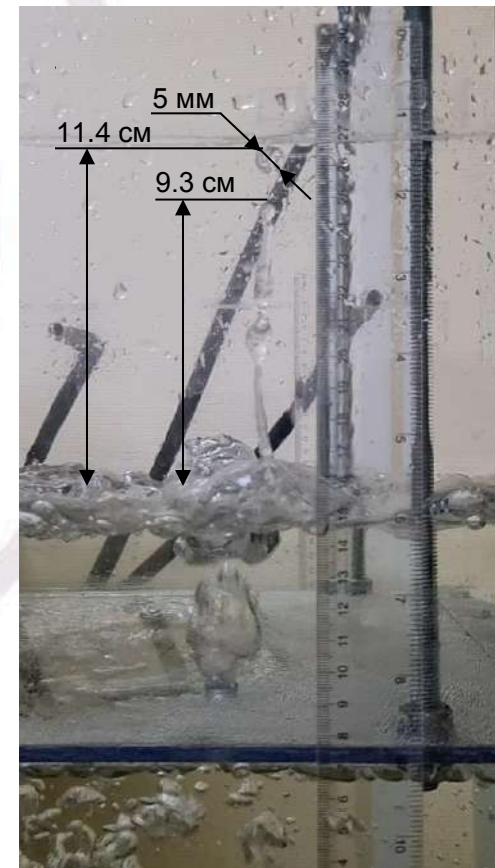
В нижней части - три раздающих короба с размерами $200 \times 200 \times 100$ мм для подачи воздуха

В центральной части установки - перфорированный лист с размерами $600 \times 300 \times 6$ мм с четырьмя отверстиями каждое диаметром 13 мм.

Эксперимент

Основные формы водяных образований были разделены на типы: БУГОР, ВСПЛЕСК, КАПЛЯ, СТРУЯ, которые также были разделены на самые частые подтипы.

Пример формирования водяного образования и определения его размеров – КАПЛЯ И СТРУЯ

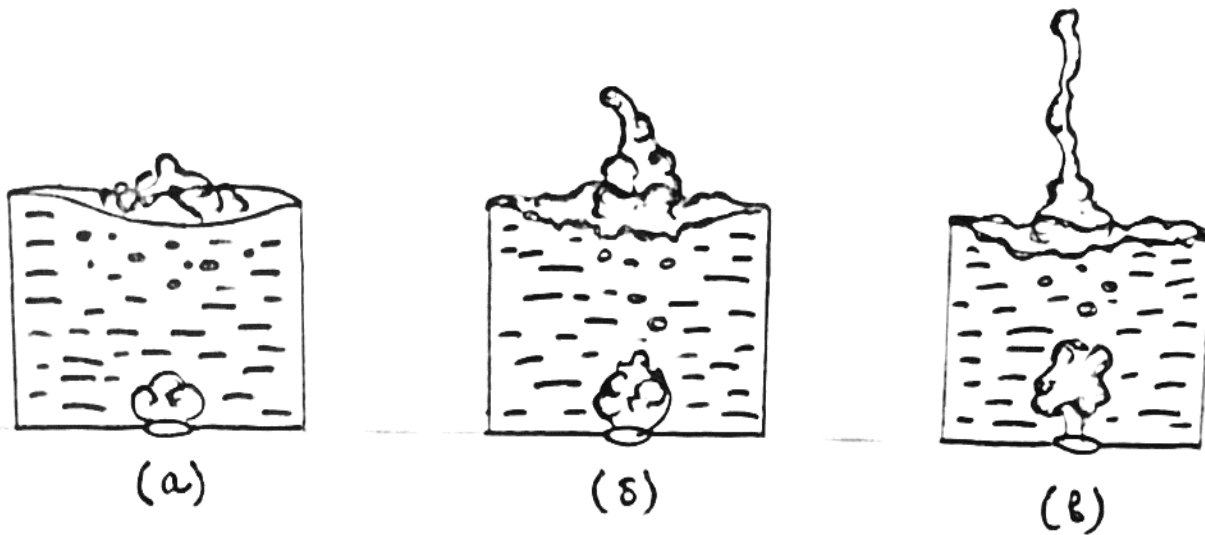


Эксперимент

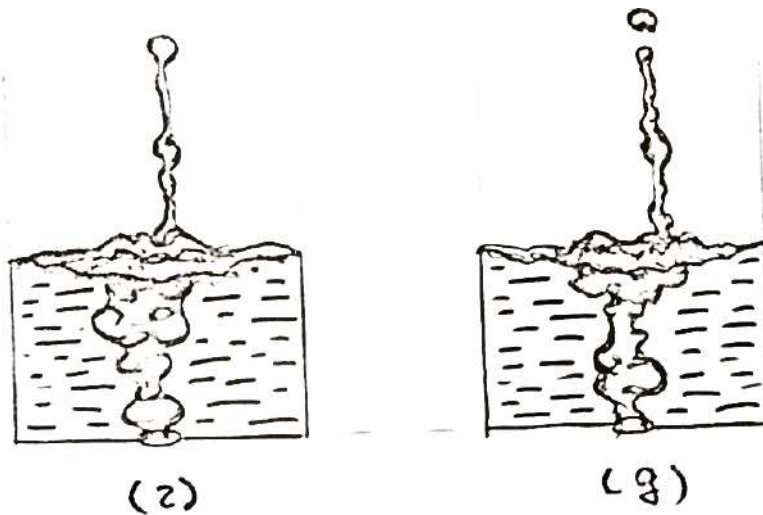
Для каждого типа были сделаны зарисовки.

Пример зарисовок для образования – КАПЛЯ И СТРУЯ

ПДЛ



ПДЛ

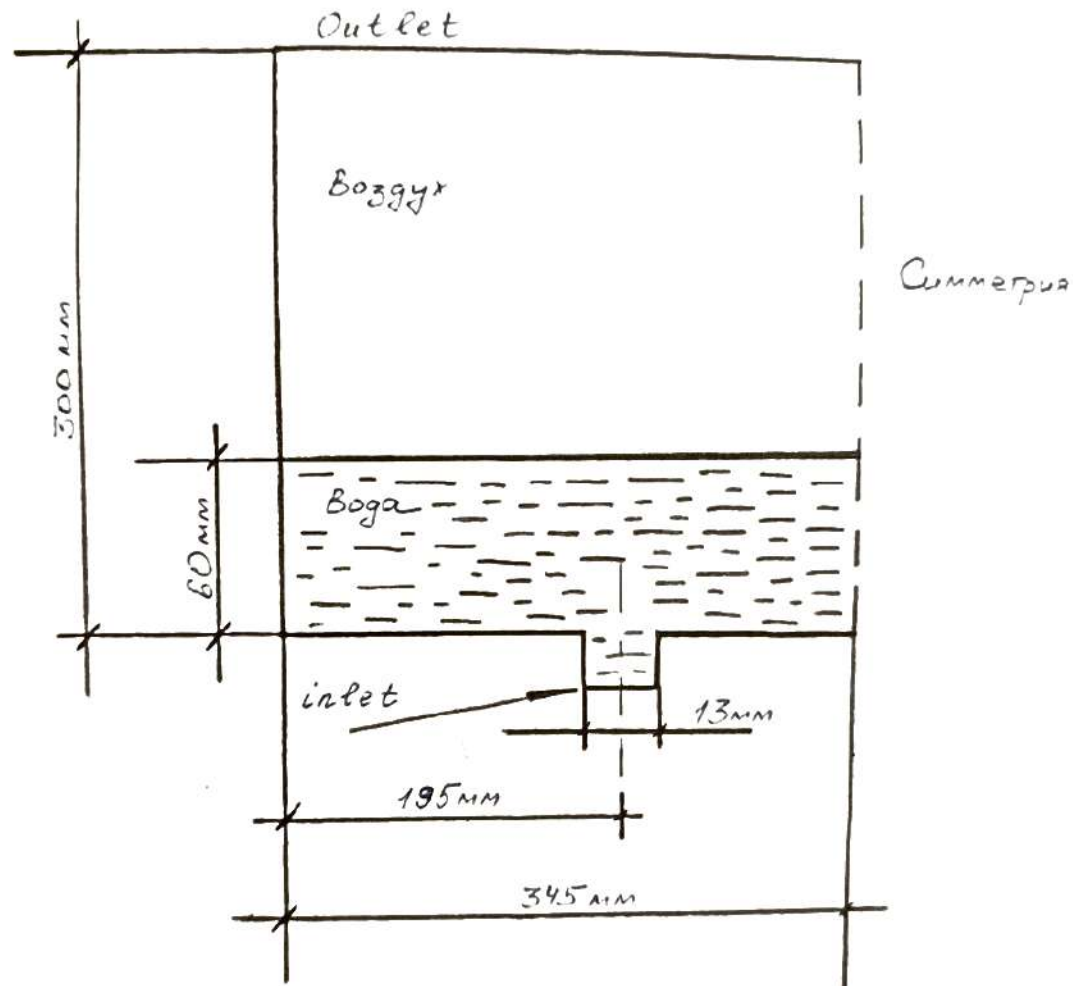


Эксперимент

Форма образования	Количество образований в эксперименте	Средний диаметр капель, мм	Максимальная высота подъёма, см
Бугор	155	-	8.2
Всплеск	28	-	16.0
Капли			
Одна капля	38	2.8	16.4
Несколько капель	22	3.2	14.4
Струи			
Одна струя	126	-	15.7
Несколько струй из одной	1	-	7.4
Струя с каплей	13	4.2	13.8
Струя с дробью капель	8	3.3	9.4

Моделирование

Математическая модель



Расчётная область

Моделирование

Метод решения

Для создания математической модели использовался открытый код OpenFOAM. Расчёты проводились с помощью метода VOF (Volume Of Fluid), который реализовывался программой interFOAM

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + u_j \frac{\partial \alpha}{\partial x_j} = 0 \quad \text{— уравнение переноса объёмной доли}$$

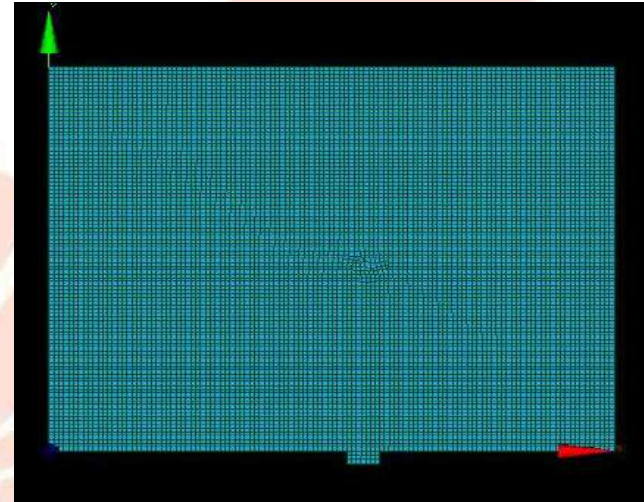
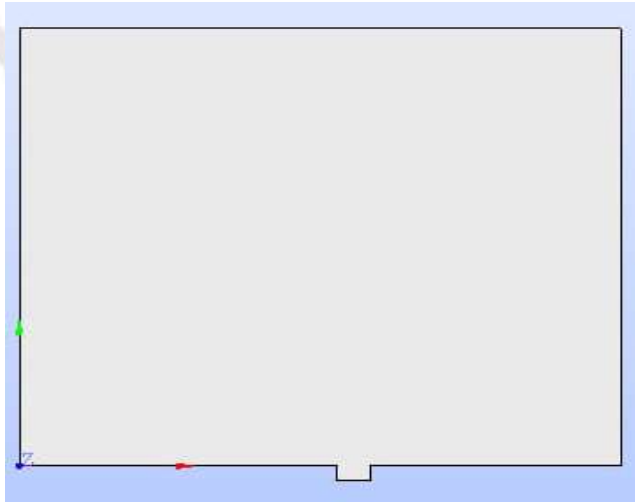
$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \mu g_i + F_{\sigma i}$$

— уравнение импульса

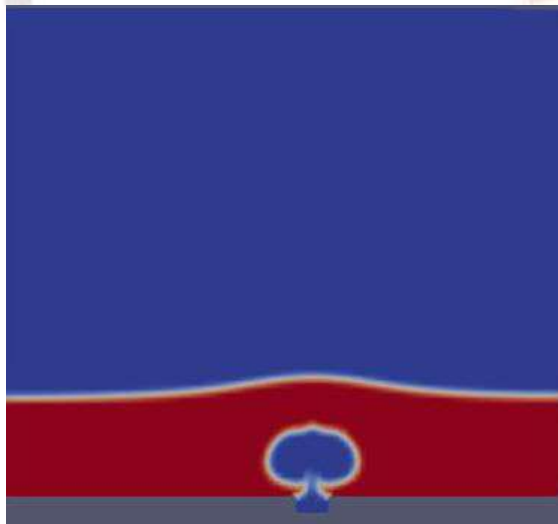
$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad \text{— уравнение неразрывности}$$

Моделирование

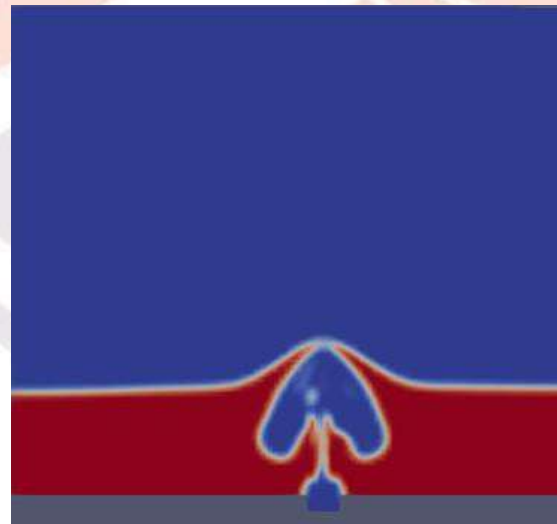
Построение геометрии и расчётной сетки:



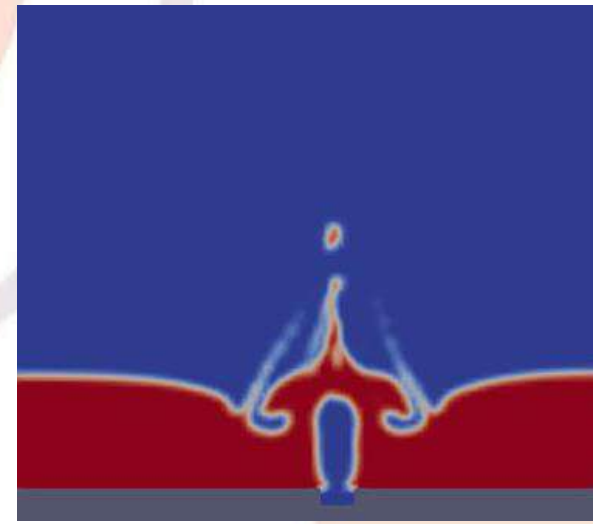
Результаты:



0.1 с

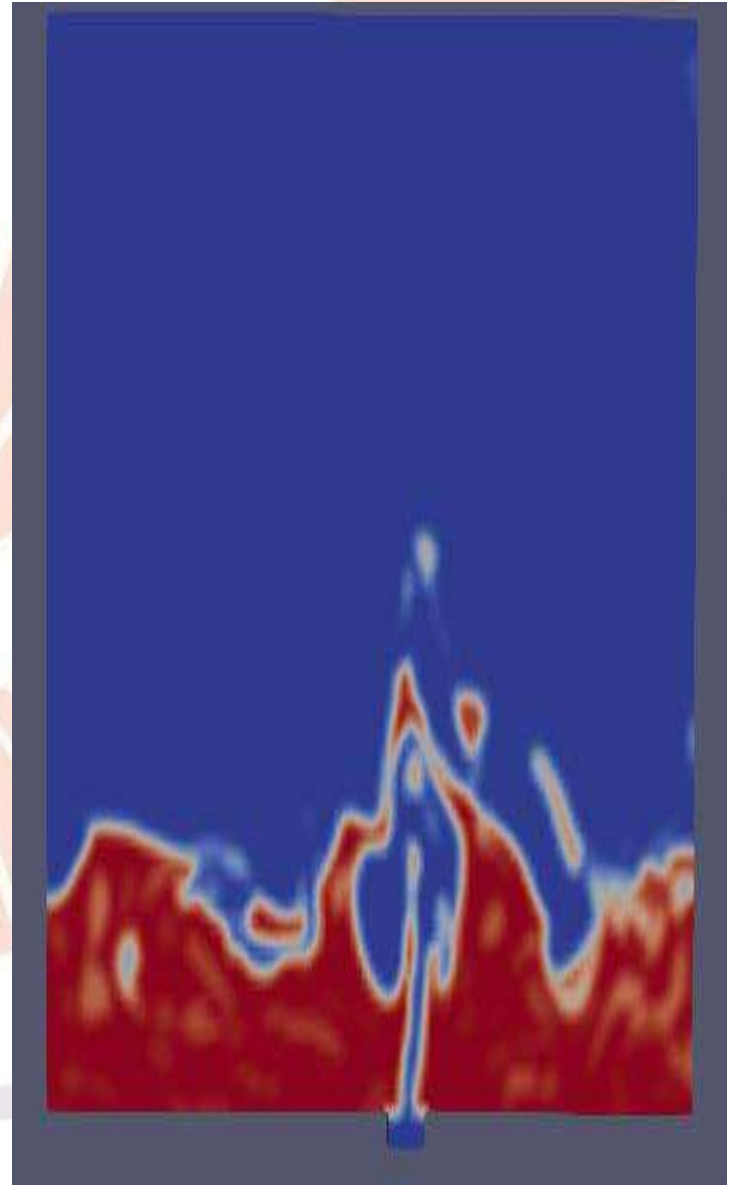


0.2 с

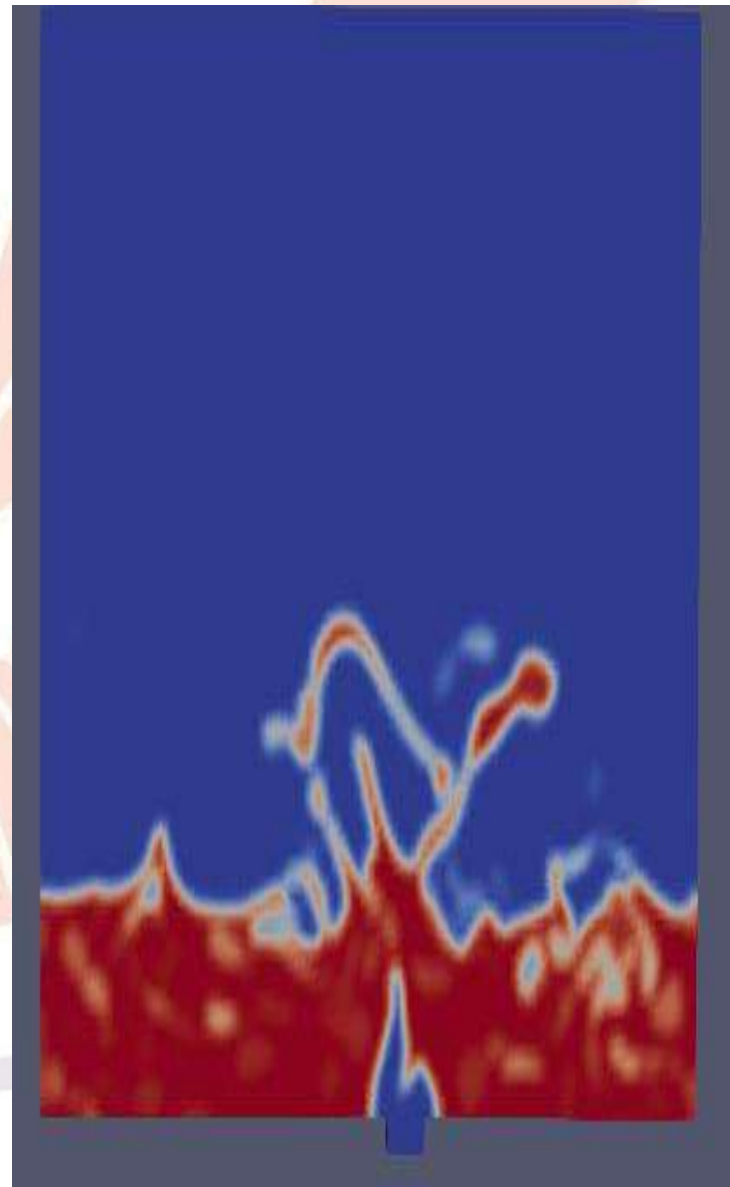


0.3 с

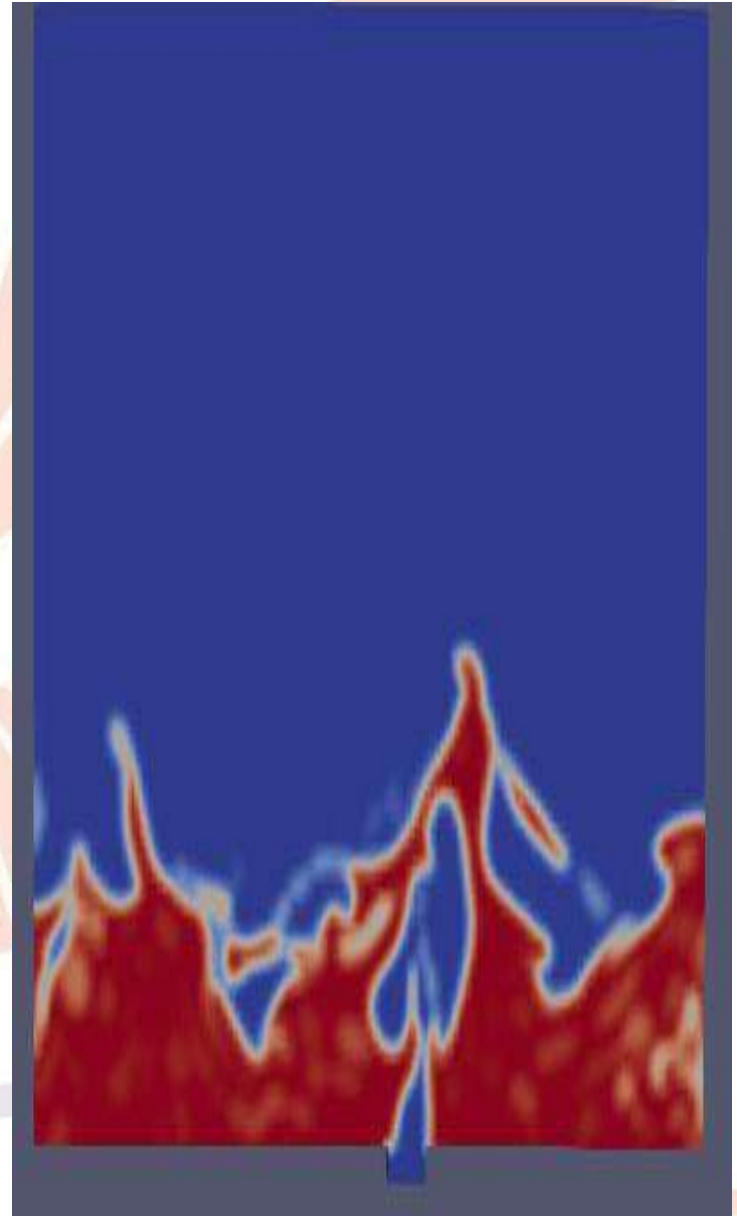
Бугор



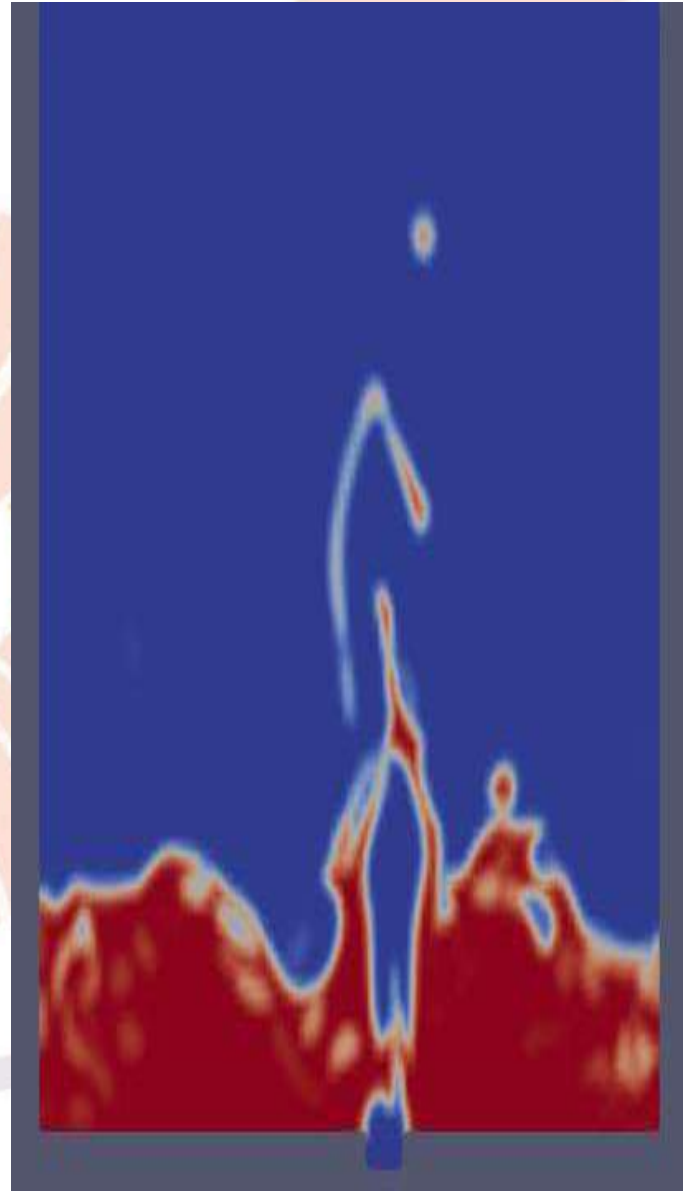
Всплеск



Струя



Струя и капля



Сравнение результатов эксперимента и моделирования

Тип образования	Максимальная высота подъёма, см	
	Эксперимент	Моделирование
Бугор	6.8	8.16
Всплеск	8.9	7.5
Струя	9.6	9.6
Струя и капля	Струя - 14.3	11.4
	Капля - 15.2	12.7

Вывод:

Проведенное сравнение экспериментальных данных с результатами расчётов показало их хорошее совпадение. Таким образом, результаты моделирования можно считать приемлемыми.

Благодарности

Хотелось бы поблагодарить моего научного руководителя профессора Мелихова Олега Игоревича за интересную тему и предложения, связанные с её реализацией.

Консультанта старшего преподавателя кафедры АЭС Токарева Сергея Александровича за помощь в проведении экспериментов на установке «Барботёр» и всестороннюю поддержку.

Особую благодарность хочется выразить старшему преподавателю кафедры АЭС Салеху Башару Фаизовичу за помощь в освоении нужных знаний и программ для моделирования процесса барботажа, за его готовность помочь в любое время и искренний интерес, который он неоднократно проявлял к моей работе.



Спасибо за внимание!



АНАЛИЗ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ АЭС И АСММ: инженерный взгляд на будущее

Выпускная квалификационная работа бакалавра по специальности «Атомные электростанции» — это не просто расчётная задача, а, по сути, инженерно-экономическое обоснование жизнеспособности и целесообразности создания сложного энергетического объекта. В центре такого исследования всегда стоит анализ проектных решений. Этот раздел является ключевым, поскольку именно здесь студент демонстрирует способность не просто выполнять вычисления, а критически оценивать, сравнивать и аргументированно защищать выбранный технический вариант.

Анализ проектных решений в проектах крупных АЭС

При работе над проектами традиционных атомных электростанций (АЭС) с реакторами большой мощности (например, серий ВВЭР-1200) анализ проектных решений направлен на оптимизацию уже устоявшихся и хорошо изученных технологий.

Цель такого анализа — доказать, что выбранный проектный вариант является оптимальным по

совокупности технико-экономических показателей и соответствует всем современным нормам безопасности.

Анализ проектных решений в проектах АСММ

Тематика атомных станций малой мощности (АСММ) — это передний край атомной науки и техники. Здесь анализ проектных решений приобретает совершенно иное значение. Поскольку многие технологии АСММ (например, интегральная компоновка реактора, использование новых теплоносителей) ещё не имеют длительной истории промышленной эксплуатации, анализ становится главным инструментом снижения рисков и обоснования инноваций.

Таким образом, анализ проектных решений в выпускной работе — это демонстрация зрелости будущего инженера-атомщика. Умение критически мыслить, сравнивать альтернативы и делать обоснованный выбор является фундаментом для дальнейшего профессионального роста, будь то участие в строительстве гигантских энергоблоков или разработка инновационных проектов атомных станций будущего.

Сравнительный анализ проектных решений основных функций систем безопасности АСММ с требованиями для АС большой мощности

Студент: Кулиев О.О.

Группа ТФ-11-21

Научный руководитель: Четвериков А.Е.

Консультант: Солдатов И.М.





В настоящее время в мировой атомной энергетике наметился тренд проектирования и сооружения атомных станций малой мощности (АСММ).





РИТМ 200



В определении МАГАТЭ «малые» - это АЭС с электрической мощностью до 300 МВт.



Рафаэль Мариано Гросси

➤ В настоящее время в 18 государствах-членах МАГАТЭ на разных стадиях разработки и внедрения находятся более 80 проектов основных технологических решений АСММ.

➤ Одним из технологических достижений, привлекающих внимание тех, кто отвечает за энергетическое планирование и выработку политики, является ожидаемое к 2030 году появление нескольких АСММ.



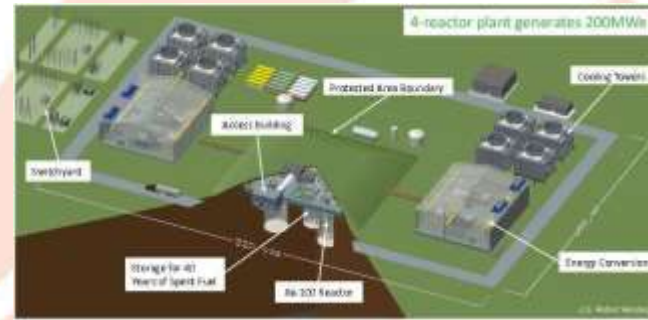
Штаб квартира МАГАТЭ



Land-based water-cooled SMR



Marine-based water-cooled SMR



High Temperature Gas Cooled SMR



Fast Neutron Spectrum SMR



Molten Salt SMR



Micro-sized SMR

➤ Госкорпорация «Росатом» наметила планы по строительству **62 реакторов** для атомных электростанций малой мощности до **2039 года**.

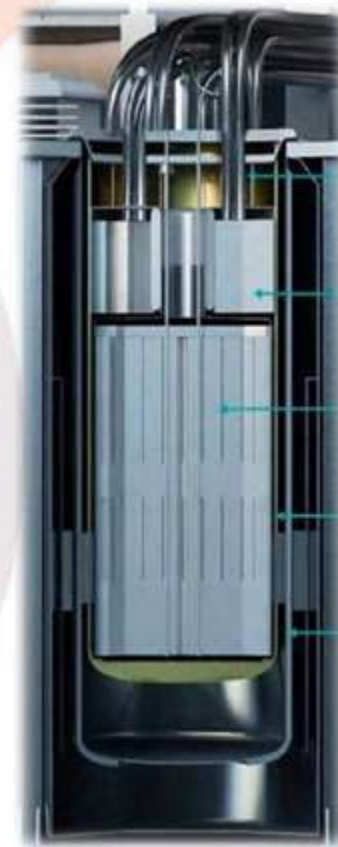


➤ Лозунг нашего времени - атомная энергетика должна быть конкурентоспособной. Она должна выдерживать конкуренцию с другими энергетическими секторами и при этом обеспечивать ещё дополнительные преимущества.





Целью работы является сравнительный анализ проектных решений основных функций систем безопасности АСММ с требованиями для АС большой мощности, для выявления проблемных вопросов связанных с существующей нормативной базой.



1. Меньший размер активной зоны реактора

2. Использование нестандартных эксплуатационных параметров

3. Использование новых материалов для топливных сборок

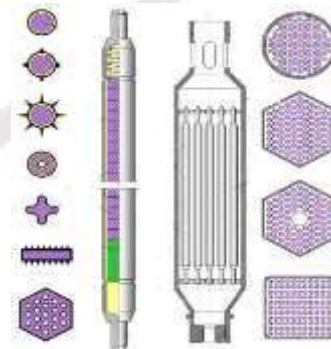
4. Использование различных стратегий управления топливным циклом

5. Использование топлива с нестандартным обогащением (свыше 4,95%) или MOX/REMIX/RepU в качестве основного делящегося материала для топливных сборок

6. Использование передовых (или комбинированных) методов контроля и управления реактивностью

7. Использование новых материалов для оболочек ТВЭЛ

8. Использование другой геометрии топливных элементов или сборок



Системы безопасности – обеспечивают выполнение критических функций безопасности (КФБ) в аварийных режимах работы АЭС.

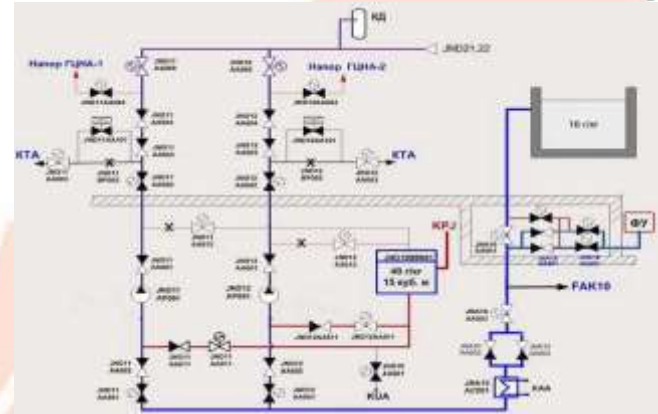
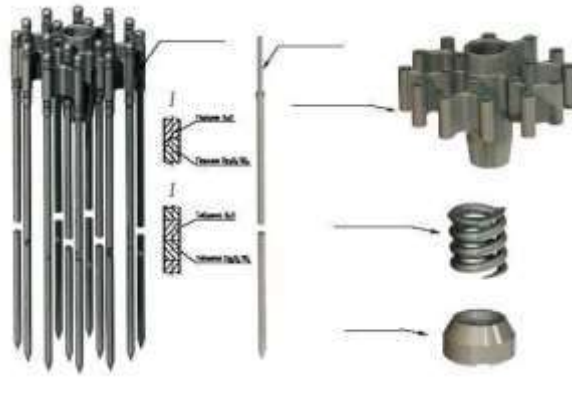


Защитные системы безопасности - предотвращают или ограничивают выход радиоактивных веществ за предусмотренные границы, защищают первые три барьера.

Локализующие системы безопасности - это системы (элементы), предназначенные для предотвращения или ограничения распространения, выделяющихся при авариях, радиоактивных веществ и ионизирующего излучения за предусмотренные проектом границы и их выхода в окружающую среду.

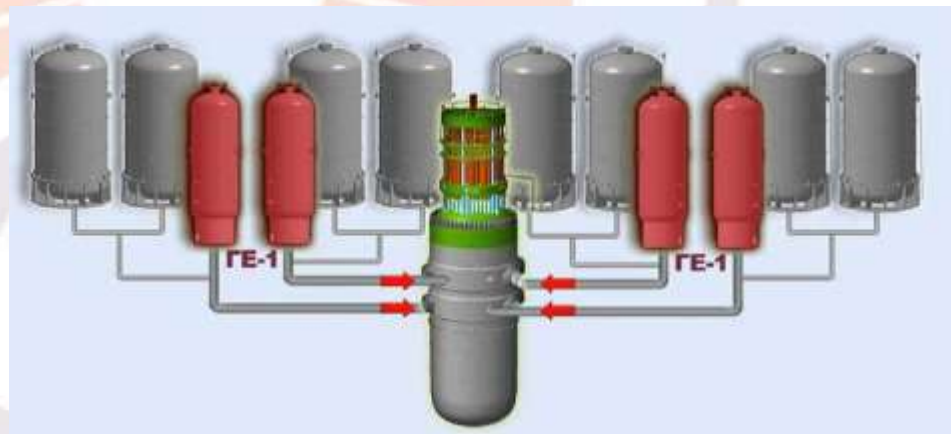
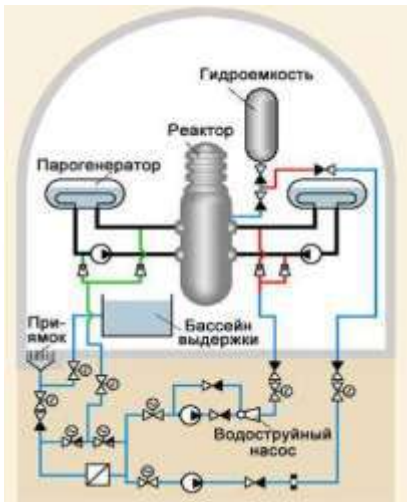
Обеспечивающие системы безопасности - это системы (элементы) безопасности, предназначенные для снабжения систем безопасности энергией, рабочей средой и создания условий для их функционирования.

Управляющие системы безопасности - осуществляют приведение в действие систем безопасности, контроль и управление их функционированием.



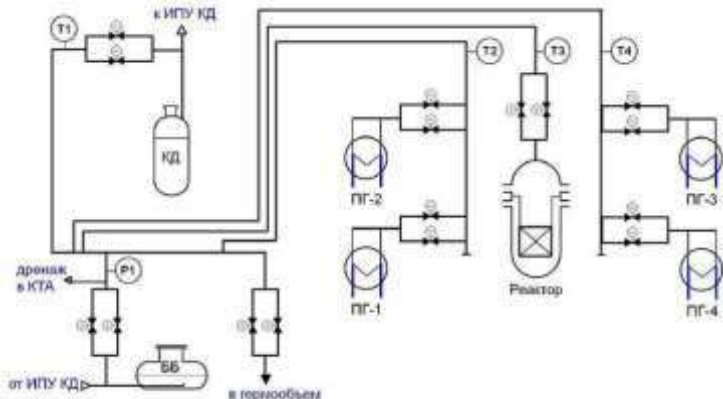
Система аварийной защиты реактора

Система аварийной ввода бора

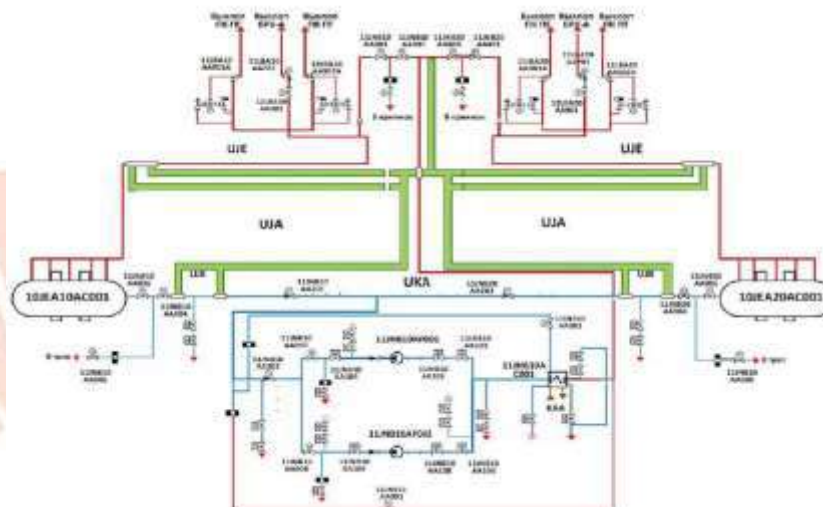


Система аварийного и планового расхолаживания первого контура и охлаждения бассейна выдержки

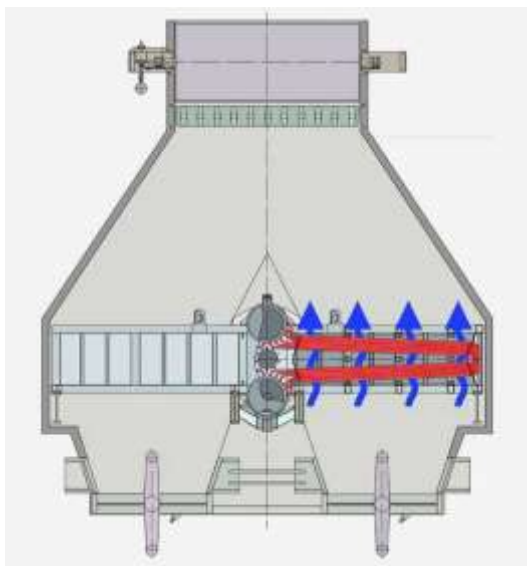
Система гидроемкостей 1-ой и 2-ой степени



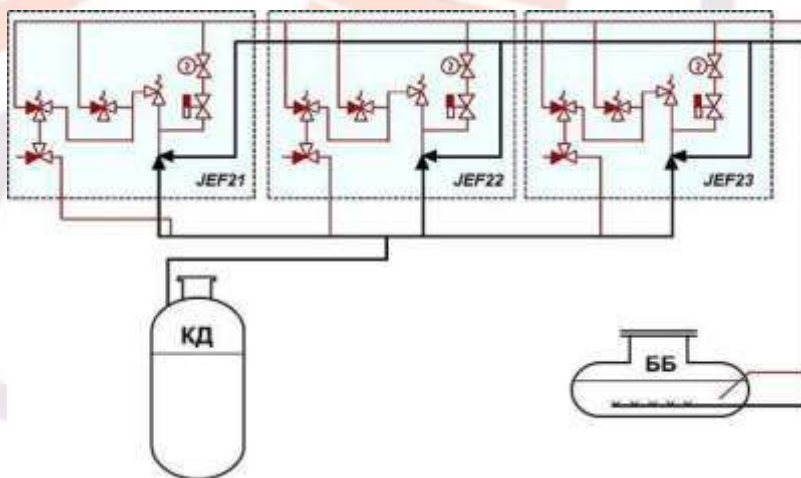
Система аварийной газоподготовки



Система аварийной расхолаживания ПГ



Система пассивного отвода тепла

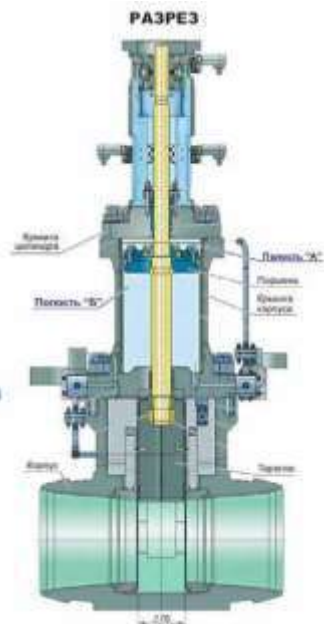


Система защиты первого контура от превышения давления

К защитным 2-го контура относятся:

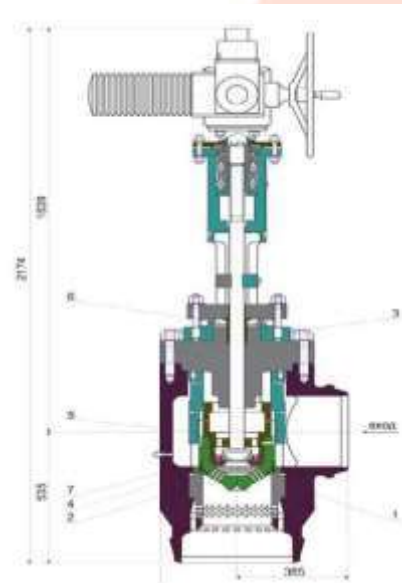


ОБЩИЙ ВИД

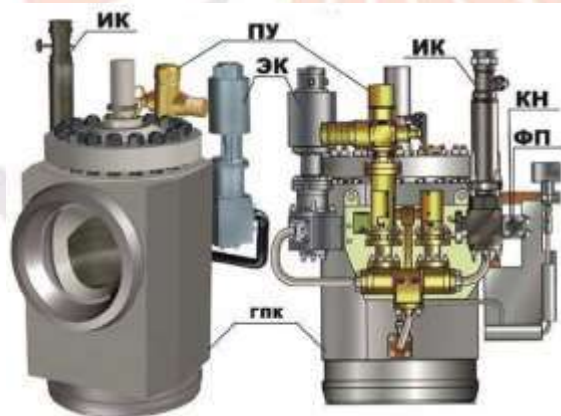


РАЗРЕЗ

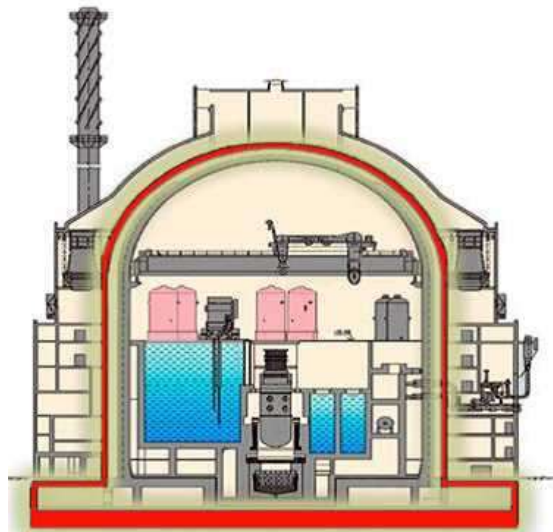
Быстродействующий запорно-отсечной клапан (БЗОК)



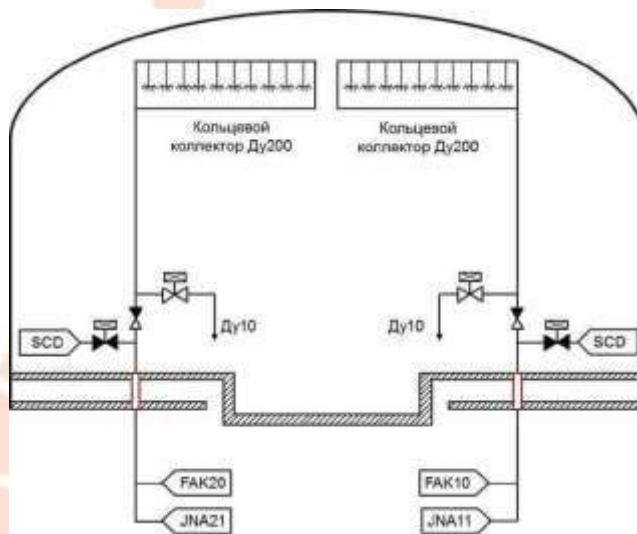
Быстрая редуцирующая установка сброса пара в атмосферу (БРУ-А)



Импульсно-предохранительные устройства ИПУ ПГ



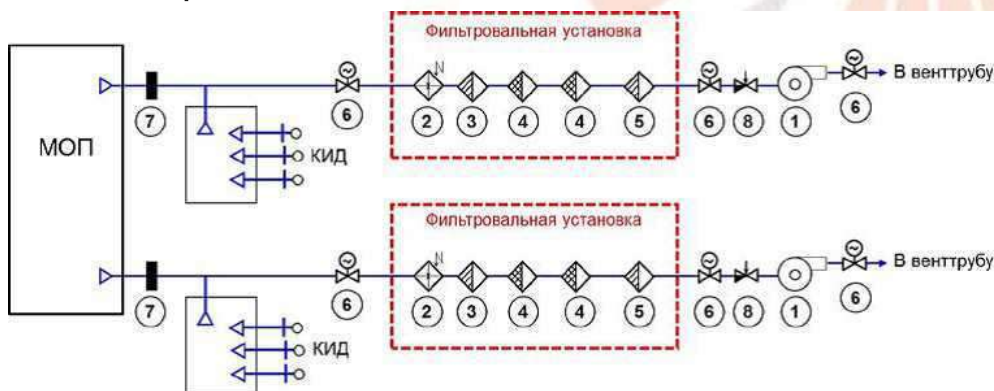
Система герметичного ограждения



Спринклерная система



Система контроля концентрации и аварийного удаления водорода под защитной оболочкой



Система создания разряжения в наружном контайнменте

Так же локализирующие функции безопасности

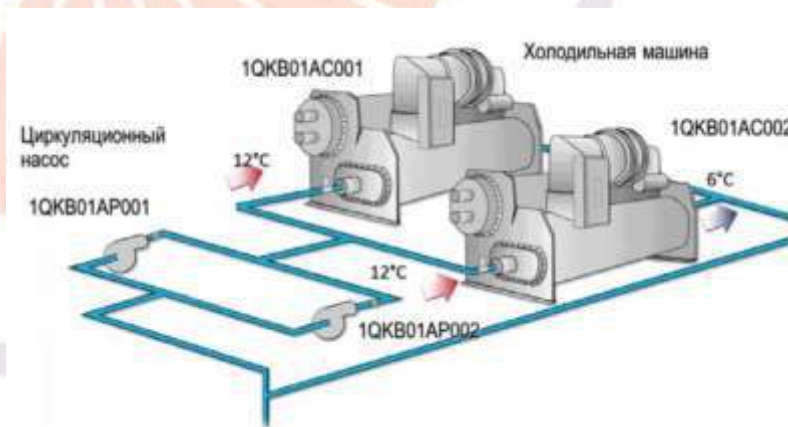
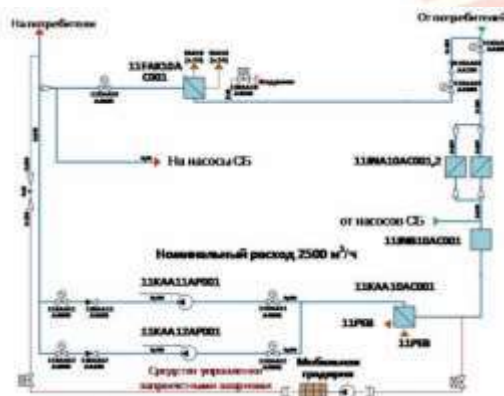
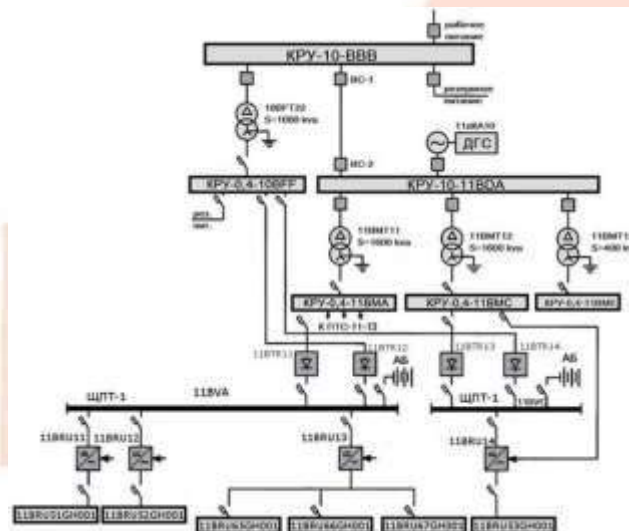
Система электропитания
собственных нужд

Система аварийного
электроснабжения

Система надежного
электроснабжения нормальной
эксплуатации собственных нужд

Система охлаждающей воды
ответственных

Охлаждающие системы вентиляции
и кондиционирования

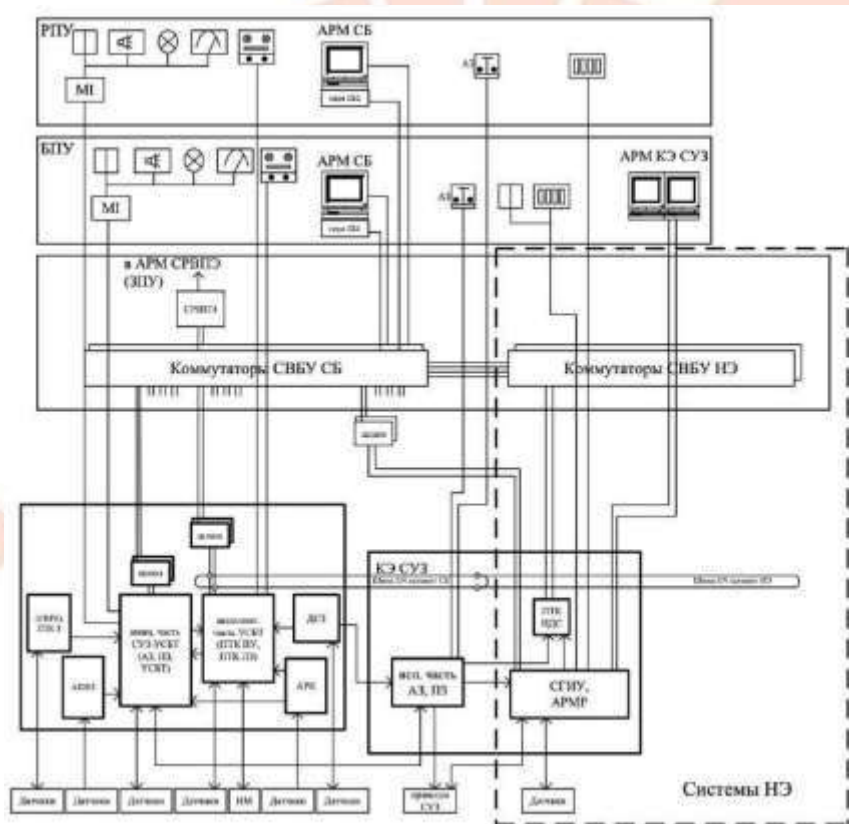


Система промконтура
ответственных потребителей
здания 10UJA

Диверсная система

Блочные и резервные пункты управления

Система СУЗ-УСБТ



1. CARE M/CNEA	Argentina		Integral PWR	100/30	7. TEPLATO R DE UWB PWR & CIBIC CIU	Czech Republic		CRV Classified Reactor Vessel	50 does not produce electricity	13. RITM-200 JSC "MFLKATER OJSC"	Russian Federation		Integral PWR	165/53	19. VK-300/NIKIET	Russian Federation		Simplified passive BWR	750/250
2. ACP100/CNCC	China		Integral PWR	385/125	8. KNUWARD DE EDF-led consortium with CEA, Naval Group, and Institut Atom	France		Integral PWR	2x540/ 2x170	14. ELENA /NRC "Kashkovo Institute"	Russian Federation		PWR	3.3-0.068	20. UK-SMR/ Rolls-Royce and Partners	United Kingdom		PWR	1276/443
3. CANDU SMIRTM/Canada Energy Inc	Canada		PHWR	960/300	9. IRIS/IRIS Consortium	Multiple Countries		Integral PWR	1000/ 335	15. KARA T-45/NIKIET	Russian Federation		BWR	180/45-50	21. mPower/BWX Technologies Inc.	United States of America		Integral PWR	575/195
4. CAP200/CGNPC	China		PWR	660>200	10. DMS/Hitachi-GE Nuclear Energy	Japan		BWR	840/300	16. KARA T-100/NIKIET	Russian Federation		BWR	360/100	22. NuScale/NuScale Power, LLC	United States of America		Integral PWR	160/50 ±12
5. DHR40/Corporation (CNCC)	China		Pool type reactor	400 none	11. JMR/Mitsubishi Heavy Industries	Japan		Integral PWR	1000/350	17. RUTA-70/NIKIET	Russian Federation		Pool-type	70/NA	23. BWRX-300/GE Hitachi Nuclear Energy, and Hitachi-GE Nuclear Energy	United States of America Japan		BWR	870/270-290
6. HAPPY200/SPIC	China		PWR	200/0 (thermal power only)	12. SMART/KAERI, Republic of Korea and KACARE/Saudi Arabia	Republic of Korea		Integral PWR	365/107	18. UNIT HERM/NIKIET	Russian Federation		PWR	30/6.6	24. SMR-160/Holtec International	United States of America		PWR	525/160

25. Westinghouse SMR/Westinghouse Electric Company LLC	United States of America		Integral PWR	800>225
--	--------------------------	--	--------------	---------

Проведя анализ систем безопасности по классификации МАГАТЭ 25 проектов АСММ наземного базирования с РУ с водным замедлителем и теплоносителем, составлены таблицы.



Защитные системы безопасности 1-го контура	Система аварийной защиты реактора	Система аварийного ввода бора	Система аварийного и планового расхолаживания первого контура и охлаждения бассейна выдержки	Система гидроемкости и 1-ой ступени (пассивная часть САОЗ)	Система аварийного газоудаления (КТР)	Система аварийного расхолаживания ПГ	Система пассивного отвода тепла (СПОТ)	Система защиты первого контура от превышения давления
CAREM (Argentina)	++2	+		+			+	+
ACP100 (China)			+	+	+		+	+
CANDU SMR (Canada)	++2	+	+	+		+		
CAP200 (China)		+	+				+	
DHR400 (China)	++2		+				+	
HAPPY200 (China)			+				+	+
TEPLATOR (Czech Republic)	+	+				+	+	+
NUWARD (France)	+	+	+	+		+	+	+
IRIS (International Consortium)	+	+	+			+		
DMS (Japan)			+	+			+	
IMR (Japan)			+			+		
SMART (Republic of Korea & Saudi Arabia)	+	+					+	+
RITM-200 (Russian Federation)	+	+			+			
UNITHERM (Russian Federation)			+					+
VK-300 (Russian Federation)	+	+	+	+			+	+
KARAT-45 (Russian Federation)					+		+	
KARAT-100 (Russian Federation)		+	+	+			+	
RUTA-70 (Russian Federation)	+		+			+		+
ELENA (Russian Federation)	+		+				+	+
UK SMR (United Kingdom)	+	+	+				+	
NuScale (USA)	+		+				+	
BWRX-300 (USA & Japan)			+	+			+	
SMR-160 (USA)		+	+	+			+	+
Westinghouse SMR (USA)		+	+	+			+	19+
mPower (USA)		+	+	+				+

Локализирующие системы безопасности	Система герметичного ограждения	Спринклерная система	Система создания разряжения в наружном контейменте	Система контроля концентрации и аварийного удаления водорода под защитной оболочкой	Локализирующие функции безопасности	Ловушки	Дней работы после аварии
CAREM (Argentina)	+	+		+		+	1,5
ACP100 (China)	+			+		+	3
CANDU SMR (Canada)	+	+	+	+	+	+	
CAP200 (China)	+			+			7
DHR400 (China)	+						26
HAPPY200 (China)	+						
TEPLATOR (Czech Republic)	+	+			+		
NUWARD (France)	+			+	+		3
IRIS (International Consortium)	+				+		7
DMS (Japan)	+			+			10
IMR (Japan)	+		+				
SMART (Republic of Korea & Saudi Arabia)	+	+					3
RITM-200 (Russian Federation)	+						3
UNITHERM (Russian Federation)	+						
VK-300 (Russian Federation)	+				+		1
KARAT-45 (Russian Federation)	+				+		
KARAT-100 (Russian Federation)	+				+		
RUTA-70 (Russian Federation)	+	+					18-20
ELENA (Russian Federation)	+						
UK SMR (United Kingdom)	+				+		3
NuScale (USA)	+	+					
BWRX-300 (USA & Japan)	+				+		7
SMR-160 (USA)	+				+		
Westinghouse SMR (USA)	+	+					20
mPower (USA)	+						30

Обеспечивающие системы безопасности	Система аварийного электроснабжения	Охлаждающие системы вентиляции и кондиционирования	Управляющие системы безопасности	Система СУЗ-УСБТ	Диверсная система защиты
CAREM (Argentina)	+ 2 ДГ		CAREM (Argentina)	+	+
ACP100 (China)		+	ACP100 (China)		
CANDU SMR (Canada)			CANDU SMR (Canada)	+	
CAP200 (China)			CAP200 (China)		
DHR400 (China)			DHR400 (China)		
HAPPY200 (China)			HAPPY200 (China)		
TEPLATOR (Czech Republic)			TEPLATOR (Czech Republic)		
NUWARD (France)			NUWARD (France)		
IRIS (Inernational Consortium)			IRIS (Inernational Consortium)		
DMS (Japan)	+ ГТГ		DMS (Japan)		
IMR (Japan)	+ ДГ		IMR (Japan)		
SMART (Republic of Korea & Saudi Arabia)			SMART (Republic of Korea & Saudi Arabia)		
RITM-200 (Russian Federation)			RITM-200 (Russian Federation)	+	
UNITHERM (Russian Federation)			UNITHERM (Russian Federation)		
VK-300 (Russian Federation)			VK-300 (Russian Federation)		
KARAT-45 (Russian Federation)			KARAT-45 (Russian Federation)		
KARAT-100 (Russian Federation)	+		KARAT-100 (Russian Federation)		
RUTA-70 (Russian Federation)			RUTA-70 (Russian Federation)		
ELENA (Russian Federation)	+		ELENA (Russian Federation)	+	
UK SMR (United Kingdom)			UK SMR (United Kingdom)	+	
NuScale (USA)			NuScale (USA)	+	
BWRX-300 (USA & Japan)			BWRX-300 (USA & Japan)		
SMR-160 (USA)			SMR-160 (USA)		
Westinghouse SMR (USA)			Westinghouse SMR (USA)		
mPower (USA)			mPower (USA)		

С чем это связано?

1. Состояние проектов

	Статус проекта	Аббрев.	Количество проектов	%
1	Under construction (В стадии строительства)	UC	2	8
2	Under regulatory review (Перед регулирующими органами)	R	3	12
3	Detailed design (Рабочая документация)	DD	2	8
4	Basic design (Базовый проект)	BD	4	16
5	Conceptual (Концепция)	C	14	56



С чем это связано?

2. Циркуляция

	Режим циркуляции	Количество проектов	%
1	Natural Circulation (Естественная циркуляция)	11	44
2	Forced Circulation (Принудительная циркуляция)	13	52
3	Combined Forced/Natural circulation (NC (below 30% of rated power)/FC (for 30-100% of rated power))	1	4

3. Локализирующие системы

	Тип гермооболочки	Количество проектов	%
1	Классическая	7	28
2	В металлическом корпусе погруженном в воду	12	48
3	Комбинированная	6	24

С чем это связано?

С чем это связано?

4. Принцип работы систем безопасности

	Принцип работы	Количество проектов	%
1	Активный принцип	2	8
2	Пассивный принцип	20	80
3	Комбинированный принцип	3	12

5. Каналы безопасности

	Кол-во каналов	Количество проектов	%
1	1-2 канала	14	56
2	2 канала	6	24
3	3 канала	5	20

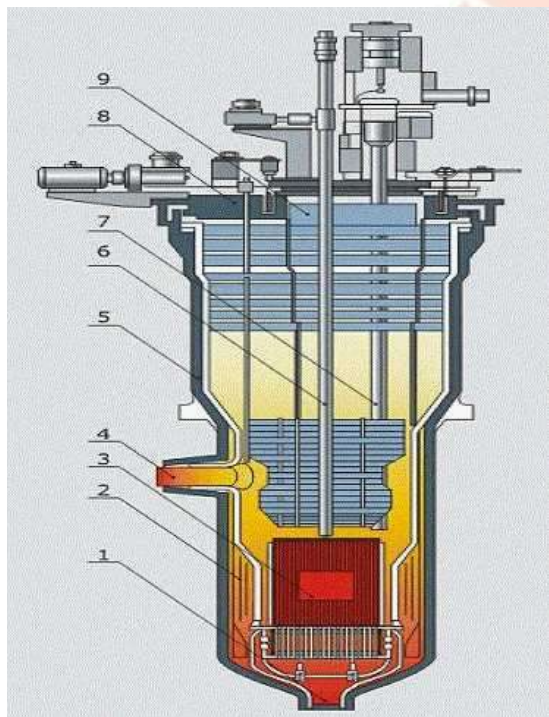
С ЧЕМ ЭТО СВЯЗАНО?

Несмотря на начало работ Росатома, Ростехнадзора, МАГАТЭ, EUR, WENRA по гармонизации, из анализа систем безопасности, рассмотренных нами проектов АСММ, следует, что проектные решения не удовлетворяют требованиям российской нормативной базы, которая разрабатывалась для АЭС большой мощности.

Предлагаю:

1. Гармонизировать нормативно правовую базу с привлечением надзорных органов, проектно-конструкторских организаций, эксплуатирующих организаций и общественности, и с учетом новых технологических решений, условий эксплуатации, новых конструкционных материалов и ядерного топлива, при соблюдении базовых принципов и критических функций безопасности.

2. Все новые АСММ перевести в разряд исследовательских реакторов для подтверждения основных характеристик безопасности и надежности работы систем безопасности.



БОР-60



ВК-50

3. Создать независимые научно-испытательные центры для подтверждения характеристик надежности оборудования для получения данных для вероятностного анализа безопасности.



РОСЭНЕРГОАТОМ
ЭНИЦ

OSU
Oregon State
UNIVERSITY

**College of Earth, Ocean,
and Atmospheric Sciences**



Спасибо за внимание!

РАЗРАБОТКА ОСНОВНОГО ОБОРУДОВАНИЯ АЭС И АСММ

Сердце любой атомной станции — это её основное оборудование, где сложные физические процессы превращаются в чистую энергию. Разработка этого оборудования для новых, перспективных проектов АЭС и атомных станций малой мощности (АСММ) является главной инженерной задачей современности. Это не просто модернизация существующих решений, а создание принципиально новых аппаратов, способных обеспечить более высокий уровень безопасности, экономичности и экологичности.

Ключевым направлением здесь выступает инновационная конструкция реакторной установки.

Для перспективных АЭС активно разрабатываются и анализируются реакторы на быстрых нейтронах со свинцовым или натриевым теплоносителем (проект «Прорыв»).

В проектах АСММ, таких как «РИТМ-200», применяется интегральная компоновка, где весь первый контур находится внутри корпуса реактора. Это решение кардинально повышает безопасность за счёт исключения трубопроводов большого диаметра, но предъявляет высочайшие требования к надёжности и компактности оборудования.

Одним из перспективных направлений является использование на АЭС и АСММ перспективных тепловых циклов, в частности, цикла Брайтона на сверхкритическом углекислом газе (SCO₂-цикл Брайтона) и бинарных циклов (например, цикл вода-фреон), позволяющих существенно улучшить экономичность и массогабаритные характеристики основного оборудования АЭС.

Не менее важна и разработка парогенераторов нового поколения, в т.ч. для SCO₂-цикл Брайтона. Это сложнейшие теплообменные аппараты, от надёжной работы которых зависит эффективность и экономичность работы всех атомной станции.

Работы бакалавров в этой области — это прямой вклад в создание энергетических технологий будущего, обеспечивающих технологическое лидерство и энергетическую независимость.

**НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
«МОСКОВСКИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ»
кафедра «Атомные электрические станции»**

Модуль нагревателя РУ РИТМ-200 на сверхкритическом CO₂

Студент: Торхова Д.А.

Группа: ТФ-12-19

Научный руководитель: Каверзнев М.М.

Москва, 2023

Описание установки РИТМ-200



*Рисунок 1. РУ РИТМ-200,
1- приводы СУЗ, 2- кассета ПГ, 3-ЦНПК, 4-АЗ*

РИТМ-200 — водо-водяной энергетический реактор. Этот проект был создан для эксплуатации на атомном флоте. По два таких реактора стоят на ледоколах нового поколения «Арктика», «Сибирь» и «Урал».

Особенности:

- интегральная компоновка
- кассетный тип ПГ
- расположение ЦНПК в отдельных выносных гермокамерах

Применение РУ РИТМ-200 не ограничится атомным ледокольным флотом, ее использование рассматривают для АСММ не только морского, но и наземного исполнения.

Задачи

Изучить основные технические решения, принятые в проекте РУ РИТМ-200

Разработать и проанализировать варианты конструктивных схем ПГ

Произвести расчёты:
тепловой; конструкционный;
гидродинамический;
экономический

Цель

Оценить возможность перехода РУ РИТМ-200 на Брайтона SCO_2 без изменения габаритных размеров РУ.

Варианты конструктивных схем

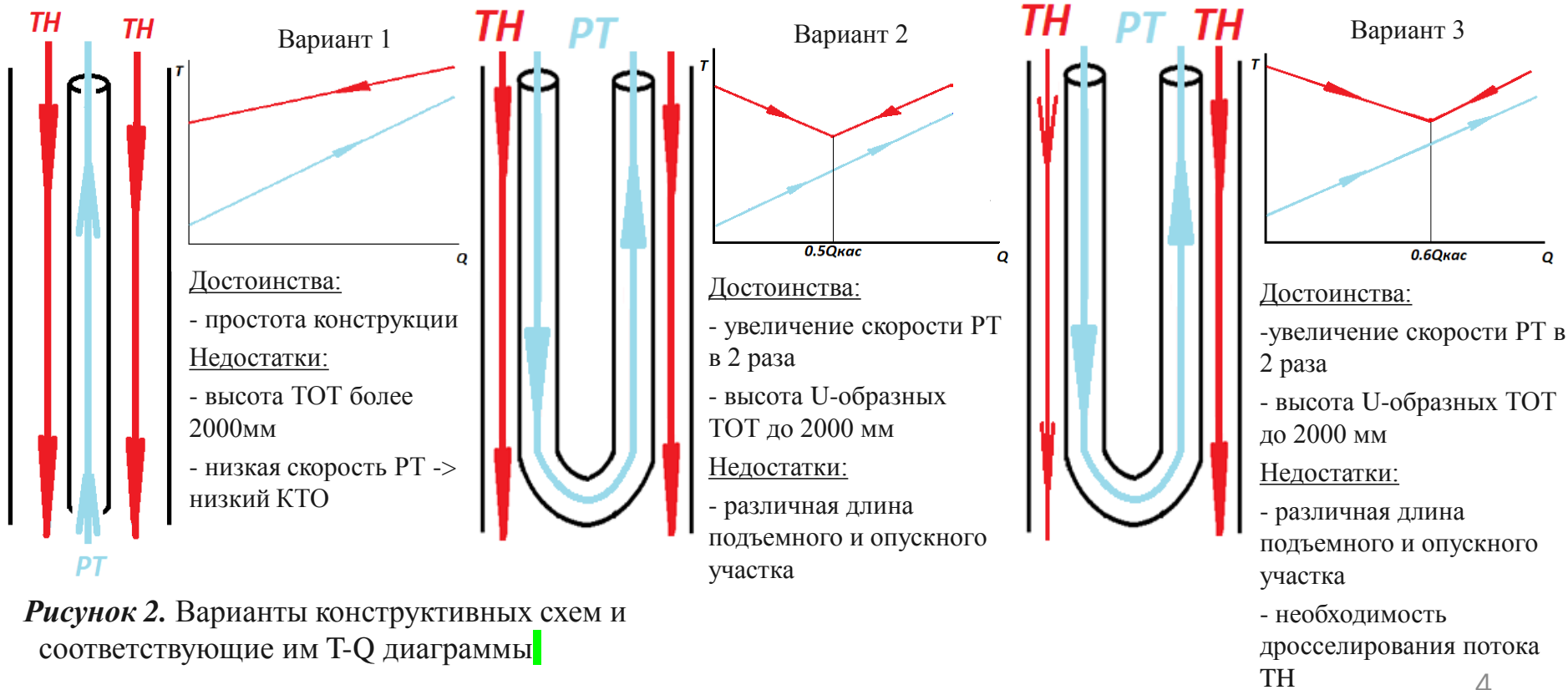


Рисунок 2. Варианты конструктивных схем и соответствующие им Т-Q диаграммы

Выбранная конструктивная схема

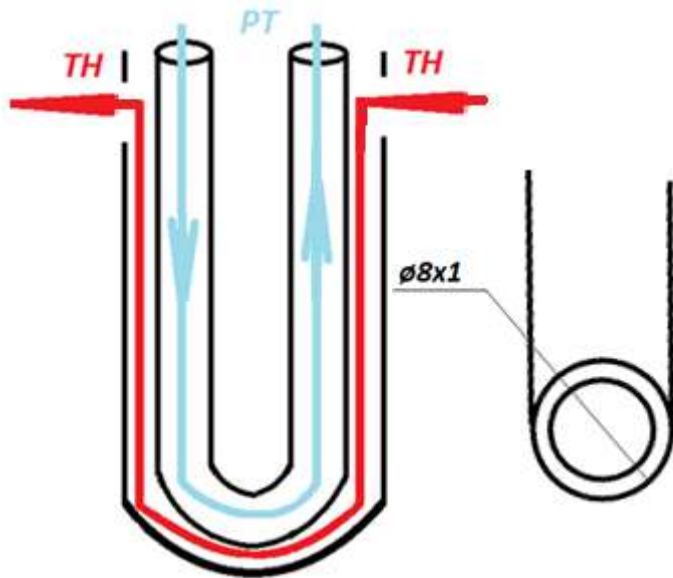


Рисунок 3. Выбранная конструктивная схема и ТОО труба

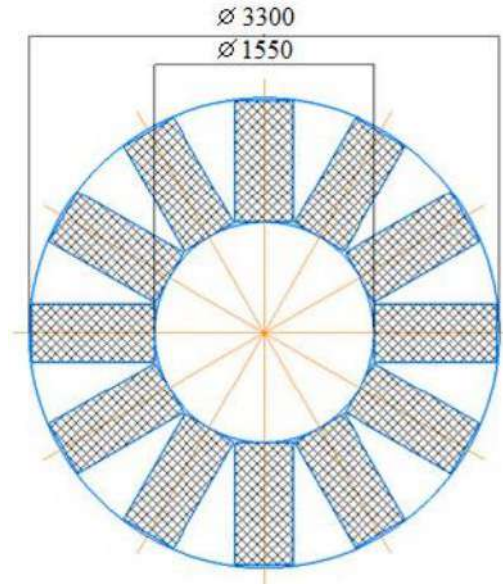


Рисунок 4. Расположение кассет в кольцевом зазоре

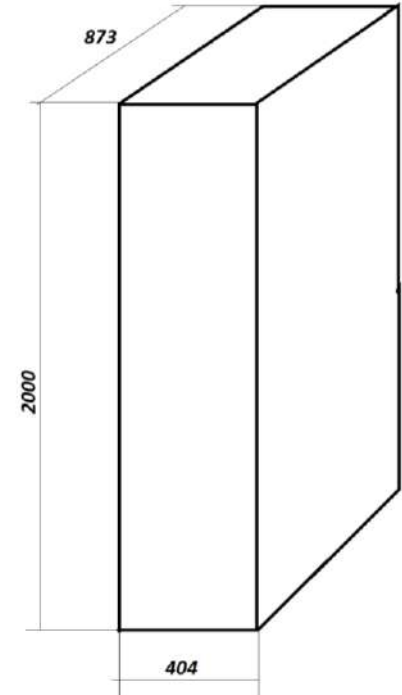


Рисунок 5. Расчетные габариты кассеты

Исходные данные для расчета



Характеристика	Значение
Тепловая мощность кассеты, МВт	14,58
Давление теплоносителя, МПа	15,7
Температура теплоносителя, °С на входе в теплообменник на выходе из теплообменника	313 277
Давление рабочего тела, МПа	20
Температура рабочего тела, °С на входе в теплообменник на выходе из теплообменника	212 293

Выбор конструкционных материалов

Деталь	Марка
U-образные ТОТ, ограждающий кожух, вытеснитель, раздающий/собирающий коллектор	Титановый сплав ПТ-7М

T-Q-диаграмма и выбор оптимальной скорости

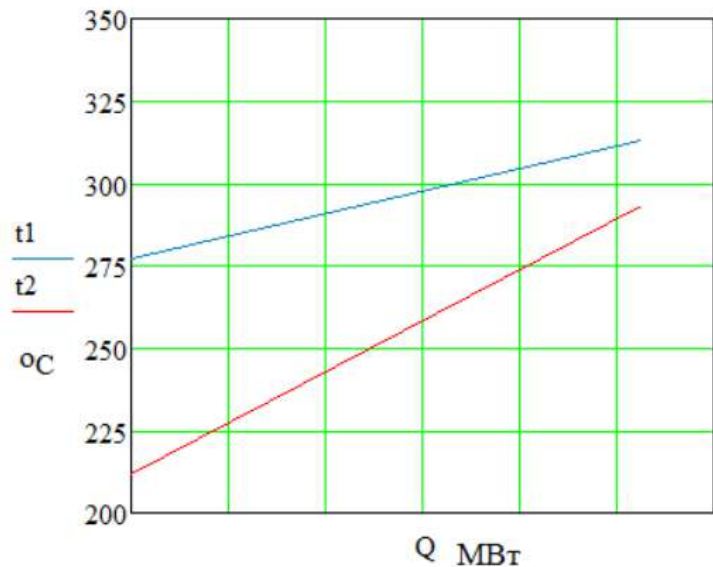


Рисунок 6. T-Q-диаграмма теплообменного модуля с U-образными модулями

t1 - температура воды
t2 - температура SCO2

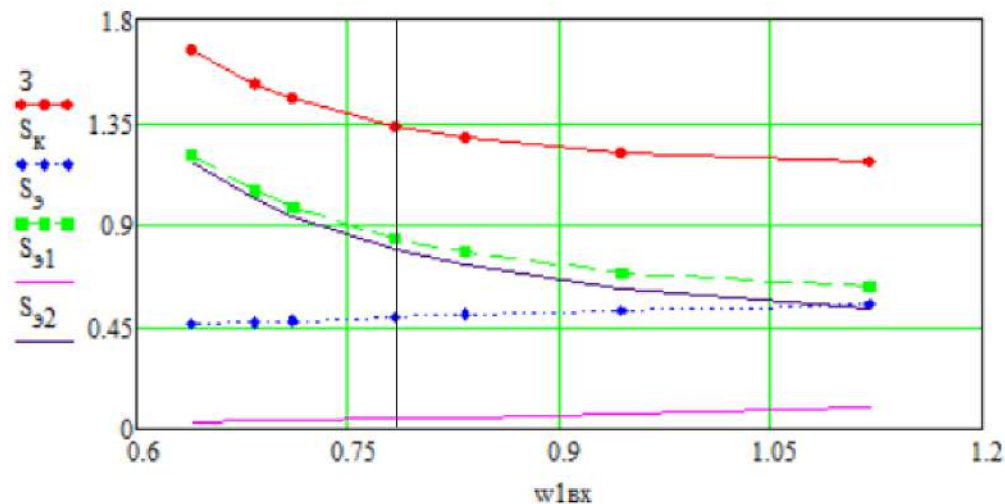


Рисунок 7. Зависимость приведенных затрат от скорости теплоносителя

z - приведенные затраты
S_K - капитальная составляющая
S₃ - суммарные затраты на электроэнергию
S₃₁ - затраты на электроэнергию (1 контур)
S₃₂ - затраты на электроэнергию (2 контур)

Конструкция теплообменника и основные технико-экономические характеристики

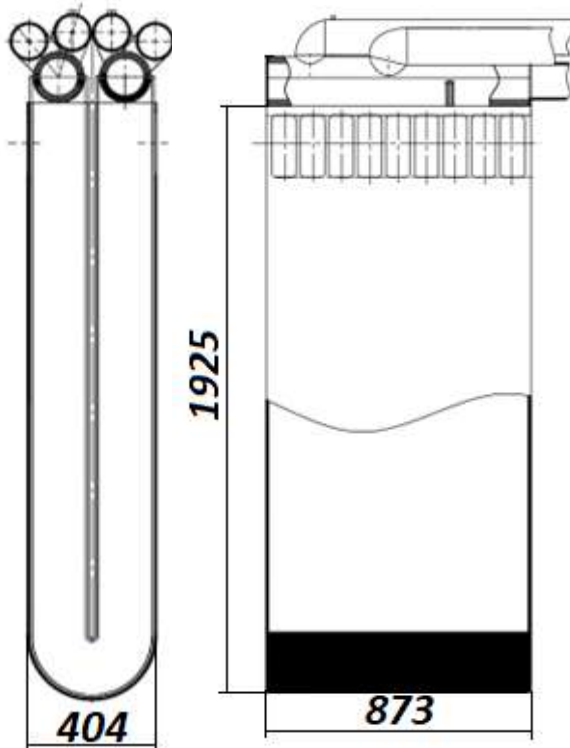


Рисунок 8. Вид спереди и вид слева теплообменного модуля

Характеристика	Значение
Тепловая мощность кассеты, МВт	14,58
Расход теплоносителя, кг/с	76,7
Расход рабочего тела, кг/с	158,5
Наружный диаметр ТОТ, мм	8x1
Количество U-образных ТОТ, шт	1743
Площадь теплопередающей поверхности, м ²	154,78
Высота теплообменной части модуля, м	1,925
Масса, кг	903,64
Стоимость, млн руб.	2,29

Вывод: таким образом расчетами подтверждена возможность замены модулей парогенератора на воде модулями теплообменников на CO_2 без изменения габаритных размеров РУ

Альтернативные тепловые циклы



Задачи

Изучить альтернативные тепловые циклы и их особенности

Рассмотреть различные вещества, применяемые в качестве РТ.
Сравнить их достоинства и недостатки

Сделать соответствующие выводы

Цель

Рассмотреть альтернативные варианты тепловых циклов и перспективы их применения в АЭ

Органический цикл Ренкина

Для эффективного использования выработанной энергии и минимизации рассеивания в окружающей среде применяют **органический цикл Ренкина (ОЦР)** с альтернативными рабочими телами, в качестве которых используются низкокипящие рабочие тела. Основным принципом данного цикла является утилизация низкопотенциальной энергии за счет рабочего тела с температурой кипения ниже, чем у воды.

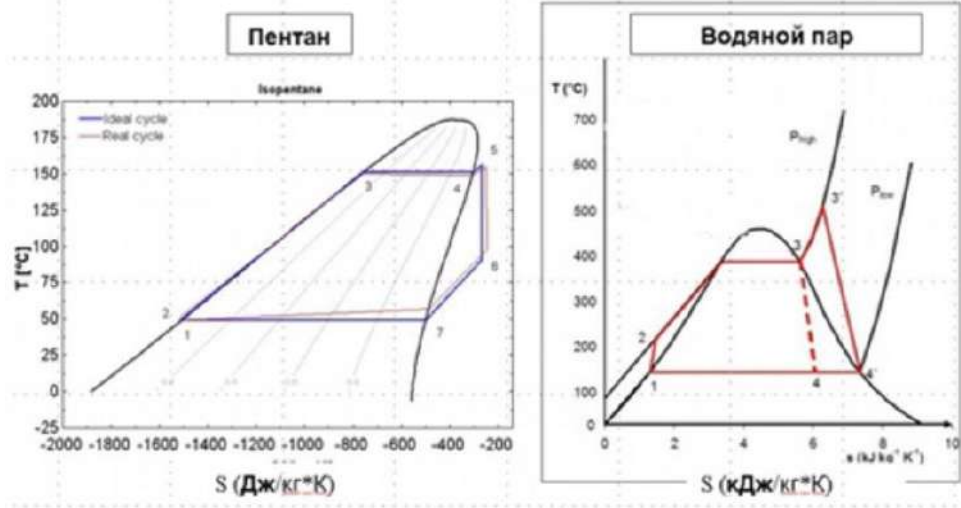


Рисунок 8. T-S – диаграмма пентана и водяного пара



Рисунок 9. Схема ОЦР

Органический цикл Ренкина на фреоне

Использование веществ с низким критическим давлением дает возможность повысить выработку электроэнергии без увеличения расхода топлива.

Достоинства:

- низкая температура кипения
- низкое критическое давление
- высокая температура разложения

Недостатки:

- при разложении образуется высокотоксичный продукт распада

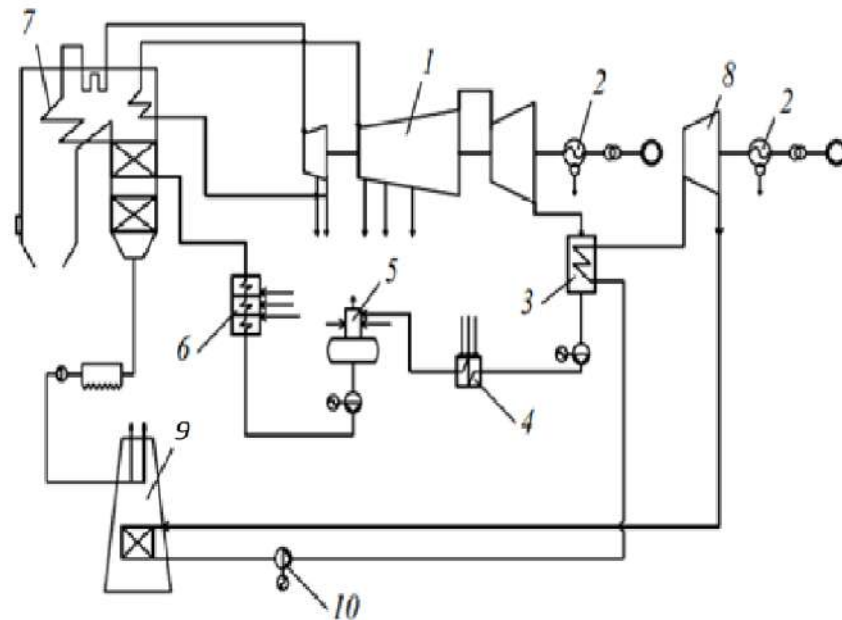
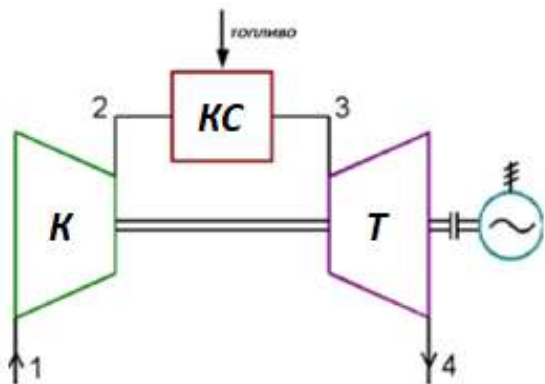


Рисунок 10. Схема конденсационного энергоблока с контуром на фреоне R-134a

Цикл Брайтона и его возможные модификации



Одним из циклов, применяющих ГТУ является цикл Брайтона, который осуществляется за счет подвода теплоты при постоянном давлении. Использование цикла Брайтона использовать температуру T около 1000°C .

Высокая температура уходящих газов может быть использована в регенерации. Ее введение повышает термический КПД, а соответственно является более экономически выгодным.

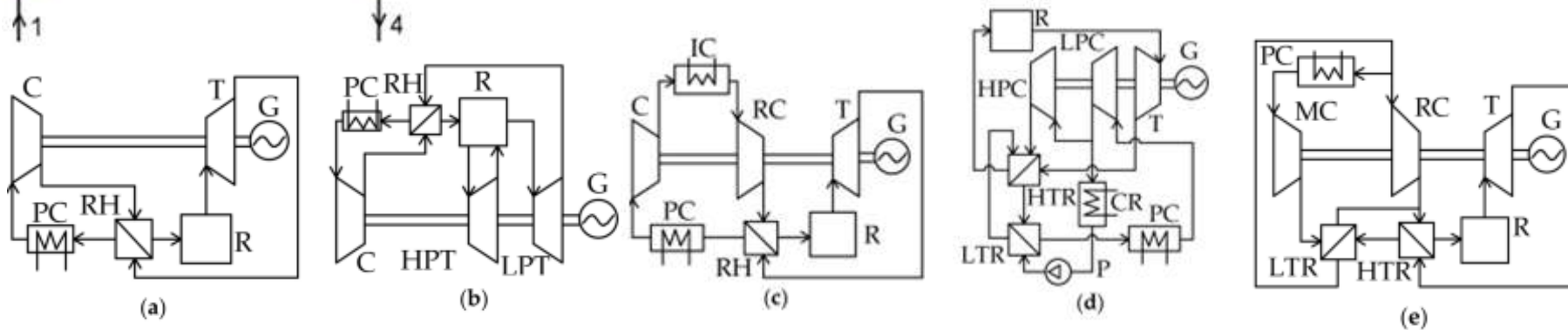


Рисунок 11. Схемы циклов Брайтона (а) – с регенерацией, (б) – с повторным нагревом, (с) – с промежуточным охлаждением, (д) – с частичным охлаждением, (е) – с повторным сжатием

Цикл Брайтона на гелии

Цикл Брайтона с гелием в качестве теплоносителя считается одним из перспективных в современной энергетике. Этот газ применим для охлаждения активной зоны реактора как на быстрых, так и на тепловых нейтронах.

Достоинства:

- инертен
- устойчив к высоким температурам до 950 °С.

Недостатки:

- текуч
- низкая теплоемкость
- высокая стоимость

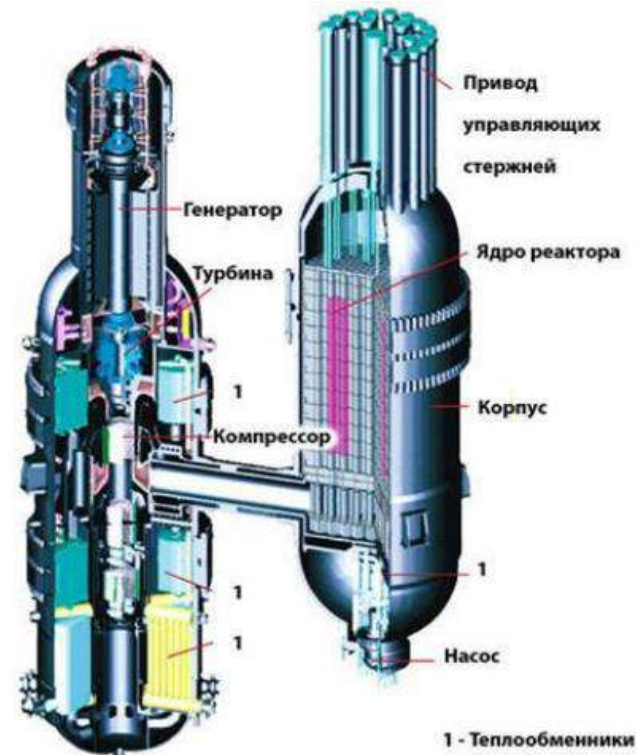


Рисунок 12. Модульным высокотемпературный гелиевый реактор с газовой турбиной 14

Цикл Брайтона на SCO_2

Цикл Брайтона на сверхкритическом диоксиде углерода применяется для увеличения коэффициента полезного действия при относительно невысокой температуре (до $650^{\circ}C$). SCO_2 имеет следующие преимущества: невысокая цена, доступность, он не взрывоопасен и не токсичен, однофазен на протяжении всего цикла.

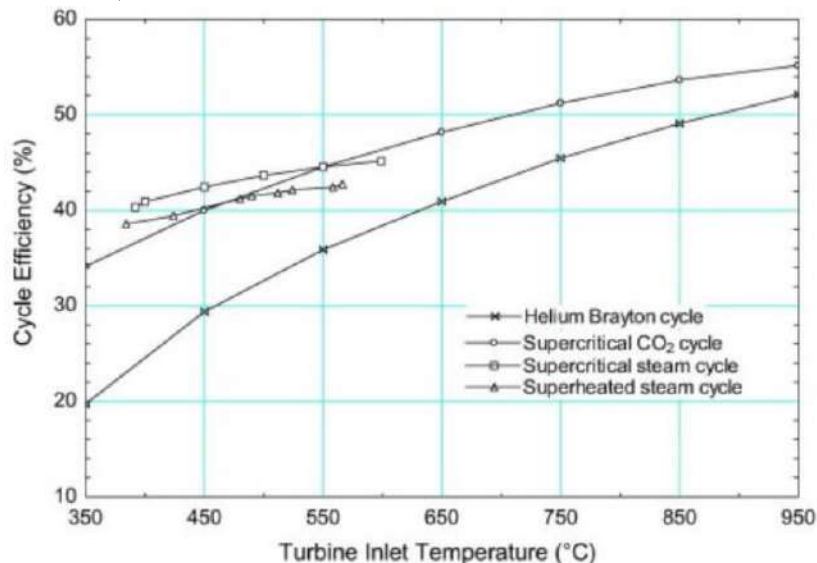


Рисунок 13. КПД цикла в зависимости от температуры на входе турбины для различных сред

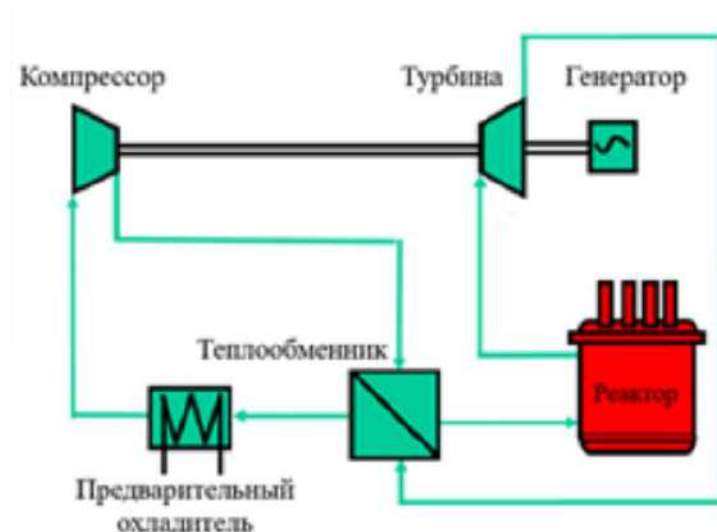
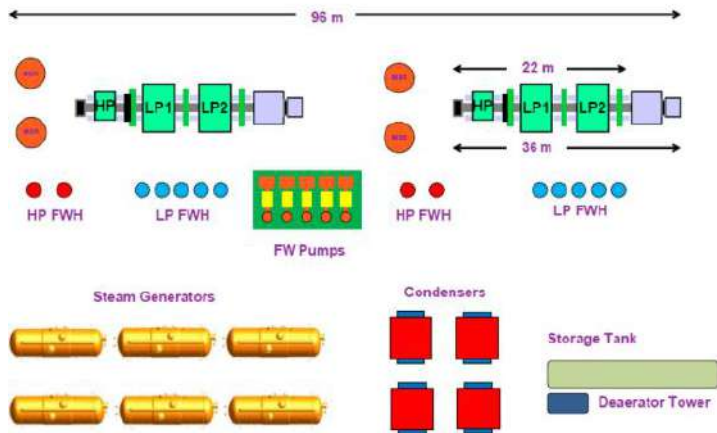


Рисунок 14. Схема цикла Брайтона на SCO_2

Сравнение цикла Брайтона и парового цикла Ренкина на АЭС Моховце

Mochovce NPP Rankine Cycle



Mochovce NPP SRRR-CO₂

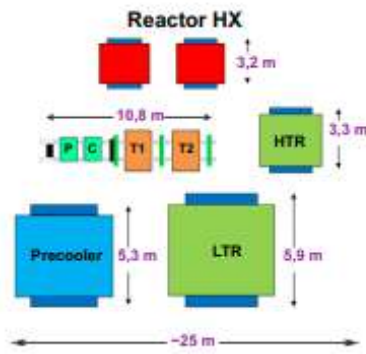
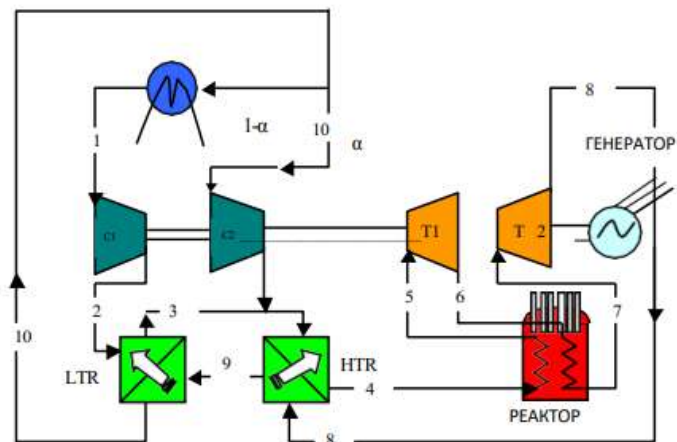


Схема регенеративного рекомпрессионного цикла Брайтона на SCO₂



- уменьшение объема, занимаемого установкой, в 8 раз;
- уменьшение длины машинного зала на 75%;
- увеличение КПД на 0,5%, в отличие от парового цикла Ренкина
- простота компоновки за счет меньшего количества трубопроводов;

Выводы



По результатам работы могут быть сделаны следующие выводы:

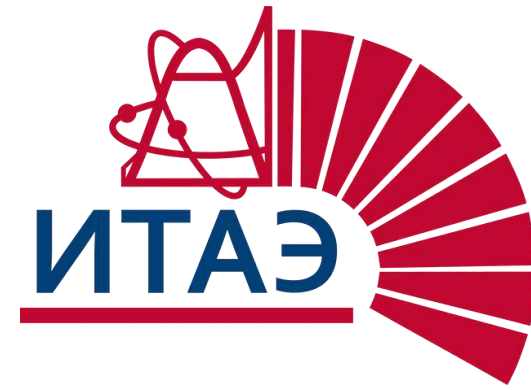
- 1) Результаты работы подтверждают возможность создания модуля теплообменника для SCO_2 в габаритах модуля ПГ для РУ РИТМ-200 и т. о. возможность перевода АЭС с данной РУ на SCO_2 цикл Брайтона без изменения конструкции реактора
- 2) Применение Органического цикла Ренкина на НКРТ недостаточно изучено для высоких начальных температур;
- 3) Применение цикла Брайтона на гелии оправдано в области высоких начальных температур, однако нецелесообразно в области параметров РУ типа ВВЭР;
- 4) Применение цикла Брайтона на SCO_2 при развитой системе регенерации позволяет получить при параметрах рабочего тела, характерных для РУ типа ВВЭР, КПД равный и даже несколько выше нежели, чем у цикла Ренкина на насыщенном паре;
- 5) Применение SCO_2 цикла позволяет значительно сократить массо-габаритные и стоимостные характеристики турбинного и теплообменного оборудования, а также габариты и стоимость машинного зала;
- 6) Таким образом, применение SCO_2 цикла Брайтона в составе АЭС с РУ типа РИТМ-200 представляется перспективным, что делает целесообразным продолжение исследований в данном направлении.



Спасибо за внимание!



Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский университет «МЭИ»



Усовершенствованный вертикальный ПГ для энергоблока ВВЭР-С в двухпетлевой компоновке

Студент: Сачков Д.А.

Группа: ТФ-11-21

Научный руководитель: Каверзнев М.М.

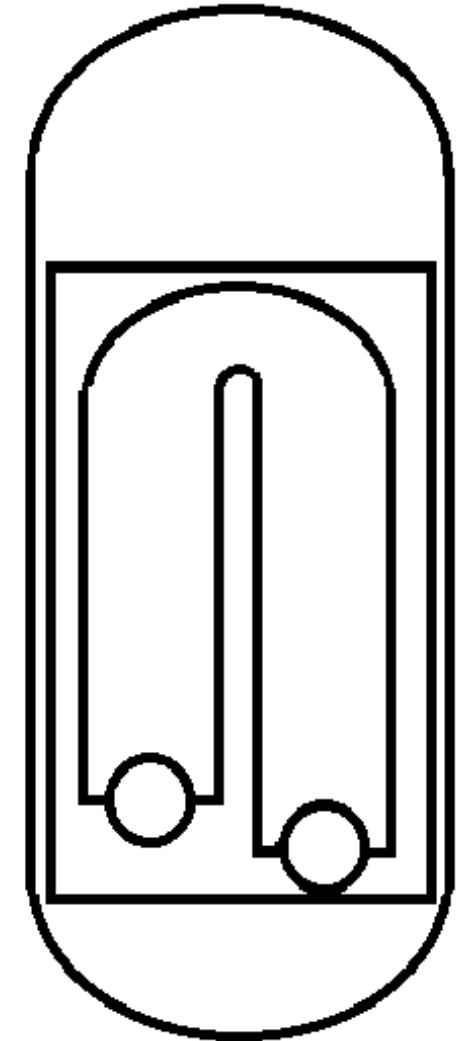
Дата: 02.07.2025

Исходные данные для расчета

Характеристика	Значение
Тепловая мощность парогенератора, МВт	800
Температура теплоносителя на входе/выходе, $t_{1\text{ВХ}}/t_{1\text{ВЫХ}}$, °С	328,6/298,2
Температура питательной воды, °С	230
Температура пара, °С	285,8
Давление теплоносителя, МПа	16,2

Выбор конструкционных материалов

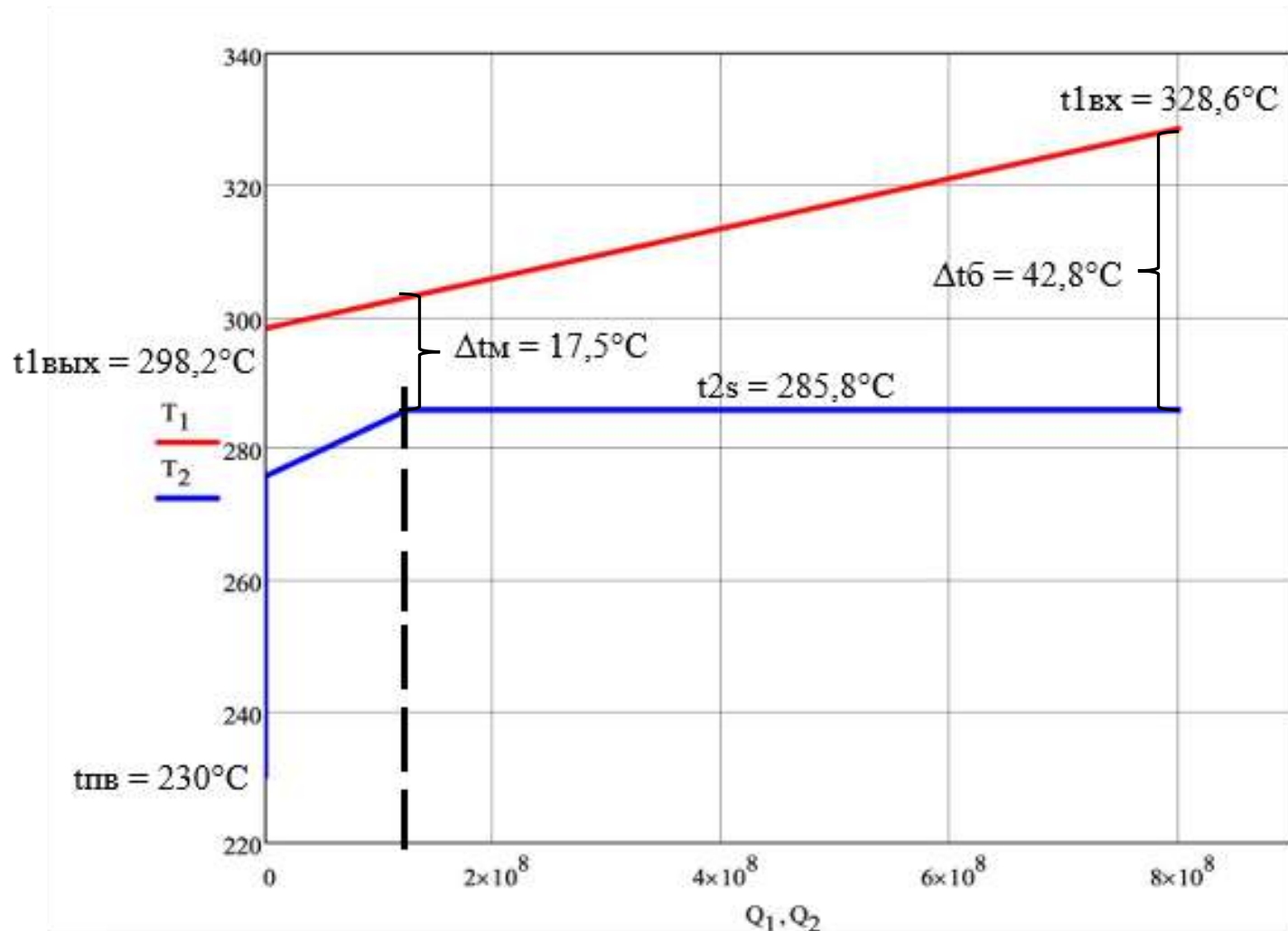
Деталь	Марка стали
Корпусные детали	10ГН2МФА
Трубы ТПП	12Х18Н10Т
Коллектора теплоносителя	10ГН2МФА



Конструкционная схема ПГ

Выбор конструкционной схемы ПГ сочетает достоинства горизонтальных и вертикальных парогенераторов, а также используются узлы и детали ПГВ.

T-Q Диаграмма и расчетные зависимости



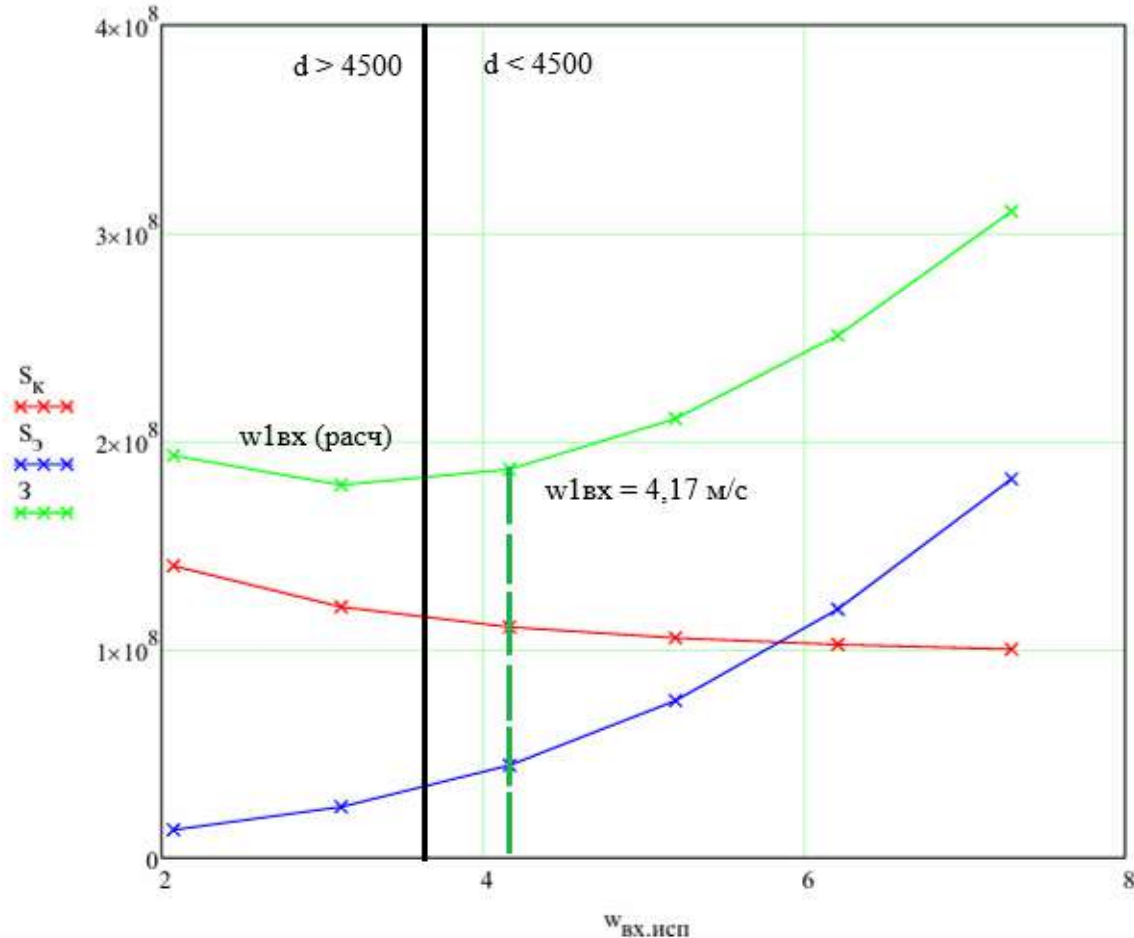
Основные формулы теплового расчета:

Ф-ла Михеева: $Nu = 0,021 Re^{0,8} Pr^{0,43} \left(\frac{Pr_{ж}}{Pr_c}\right)^{0,25}$

Ф-ла нахождения коэф. теплоотдачи: $\alpha = \frac{Nu * \lambda}{d}$

Ф-ла Лабунцова: $\alpha = \frac{3,4 * P^{0,18}}{1 - 0,0045 P} * q^{0,7}$

Выбор оптимальной скорости теплоносителя:



3 – приведенные затраты

S_k – капитальная составляющая приведенных затрат

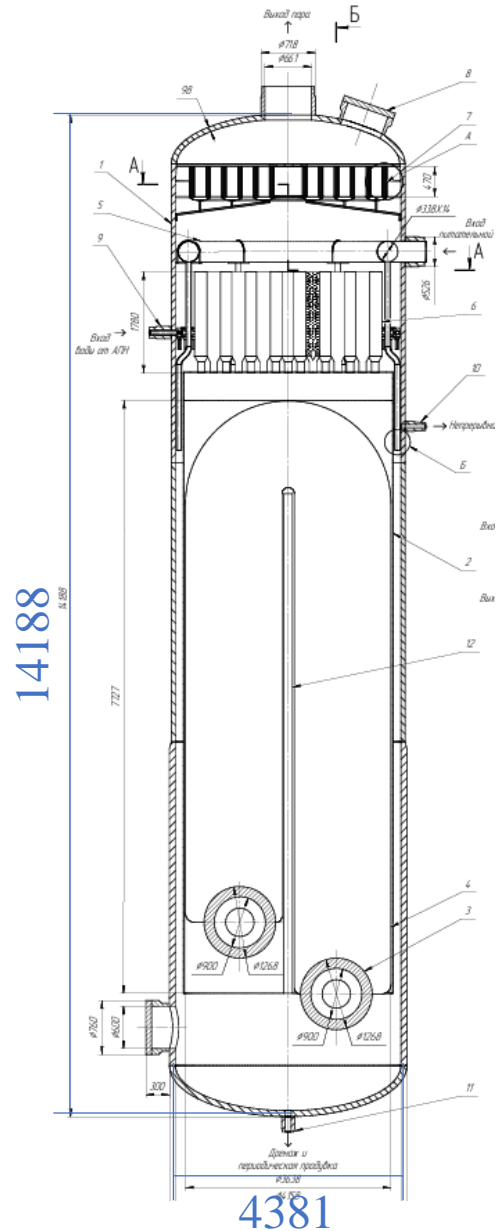
$S_э$ – затраты на электроэнергию

Технико-экономические характеристики ПГ:

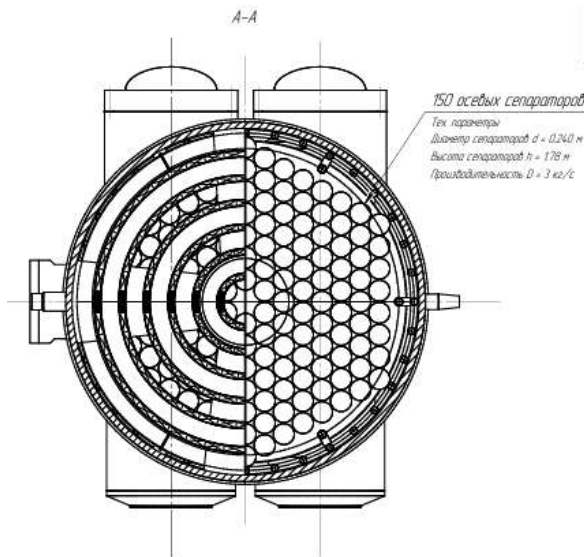
Характеристика	Значение
Паропроизводительность, кг/с	448,473
Площадь ТПП, м ²	7044
Внешний диаметр труб, мм	16
Толщина стенок труб, мм	1,5
Число труб, шт	12400
Средняя длина труб, м	12,47
Масса парогенератора, т	235
Стоимость парогенератора, млн руб	510,662

Транспортировка парогенераторов осуществляется при помощи железнодорожного транспорта. Это накладывает ограничение на габариты, диаметр парогенератора должен быть меньше 4500 мм. Размер, который удовлетворяет условия перевозки, достигается при скорости теплоносителя $w_{вх} = 4,17$ м/с.

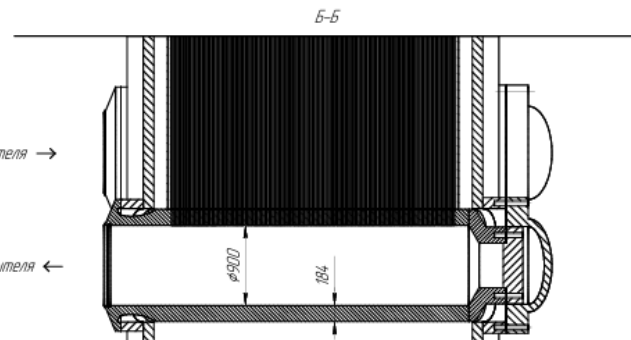
Усовершенствованный вертикальный ПГ



Сборочный чертеж ПГ



Сепараторы ПГ



Коллектора теплоносителя

Сравнение характеристик данного ПГ и ПГВ-1000 МКП

Характеристика	Усоверш. ПГ	Стандартный ПГВ
Тепловая мощность, МВт	800	803
Высота (длина), м	14,18	15
Внутренний диаметр, м	4,158	4,2
Масса, т	235	330
Цена, млн руб	510,662	-
Площадь ТПП, м ²	7044	6105



Сравнительный анализ парогенераторов для реакторных установок типа ВВЭР/PWR

Актуальность темы исследования

Проведение сравнительного анализа парогенераторов с РУ типа ВВЭР/PWR важно для выбора оптимальных конструктивных решений, а именно создания дешевого и надежного оборудования. Это позволяет повысить безопасность и конкурентоспособность российских технологий на мировом рынке.



-Горизонтальный ПГ

Преимущества:

- Умеренная паровая нагрузка -умеренные скорости среды во втором контуре (до 0,5 м/с)
- Относительно дешевая сталь 08X18H10T
- Повышенный запас воды во втором контуре
- Благоприятные условия для обеспечения естественной циркуляции теплоносителя первого контура в аварийных режимах

Недостатки:

- Требуется значительные площади под защитной оболочкой первого контура
- Существующая в настоящее время конструктивная схема горизонтальных парогенераторов имеет ограничения по уровню мощности, основной причиной которых является их значительная тепловая неравномерность по ПГ.



Вертикальный ПГ-

Преимущества:

- Экономия металла и строительного объема
- Лучшая тепловая эффективность

Недостатки:

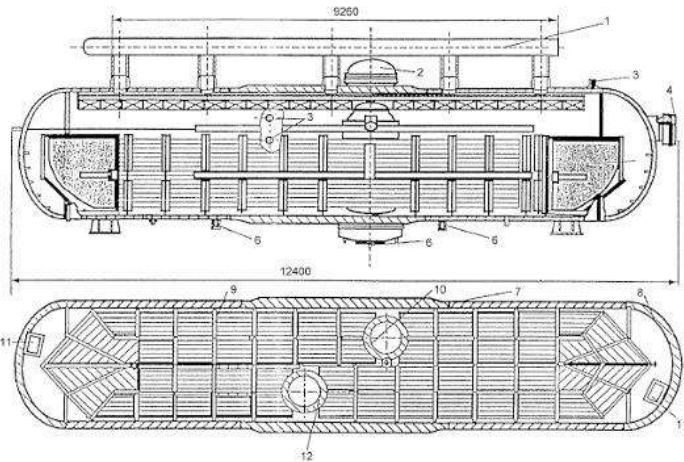
- Более длинные трубы и их меньшее количество, что уменьшает «живучесть» ПГ
- Отложения шлама на трубной доске, не удаляемые продувкой
- Вызванные эти значительные проблемы с коррозией
- Необходимость применения дорогих высоконикелевых сталей

Основные модели горизонтальных ПГ

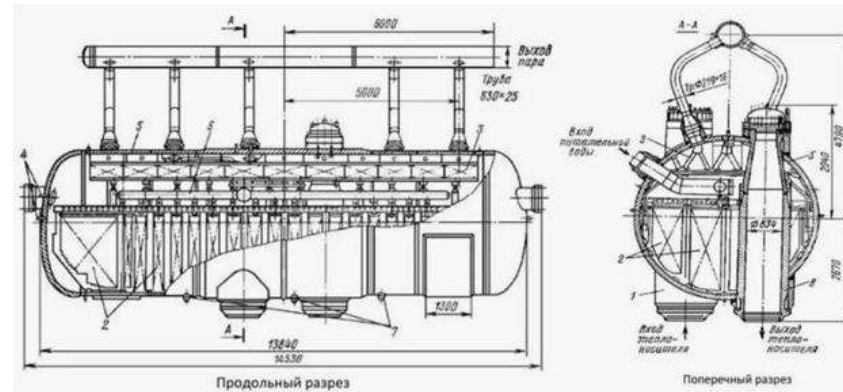
ПГВ-440 – достойный представитель отечественных парогенераторов, сочетающим в себе оптимальные конструктивные решения, высокую эффективность теплообмена и адаптацию к специфике эксплуатации на АЭС с реакторами ВВЭР-440.

ПГВ-1000 – отличается высокой эксплуатационной надёжностью. Благодаря горизонтальной компоновке он удобен для транспортировки, монтажа и технического обслуживания, что делает его одним из наиболее распространённых и востребованных парогенераторов для энергоблоков с реакторами ВВЭР-1000 в России и за рубежом.

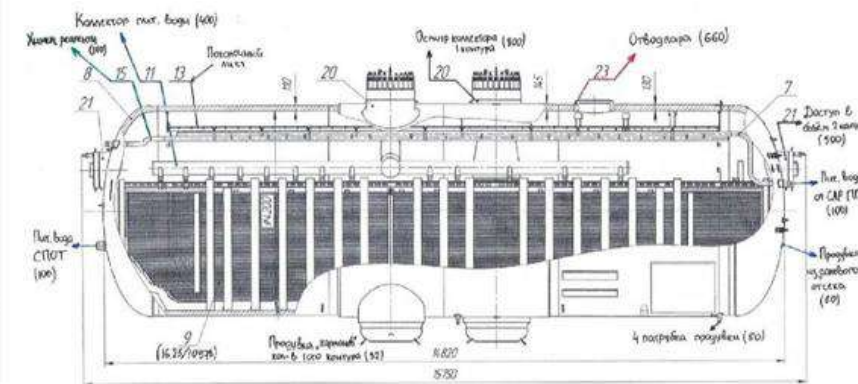
ПГВ-1000 МКО – Проект данного ПГ получился инновационным, он удовлетворяет всем требованиям современной энергетики, а именно надёжности и безопасности. Однако, эксплуатация ПГВ-1000 МКО запланирована на 2025-2029 годы. Поэтому на сегодняшний день нельзя точно сказать, насколько хорошо себя проявит ПГВ-1000 МКО на практике.



ПГВ-440



ПГВ-1000

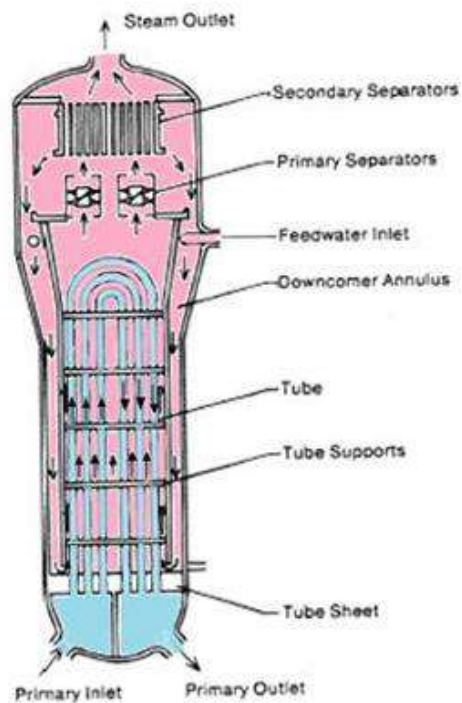


ПГВ-1000 МКО

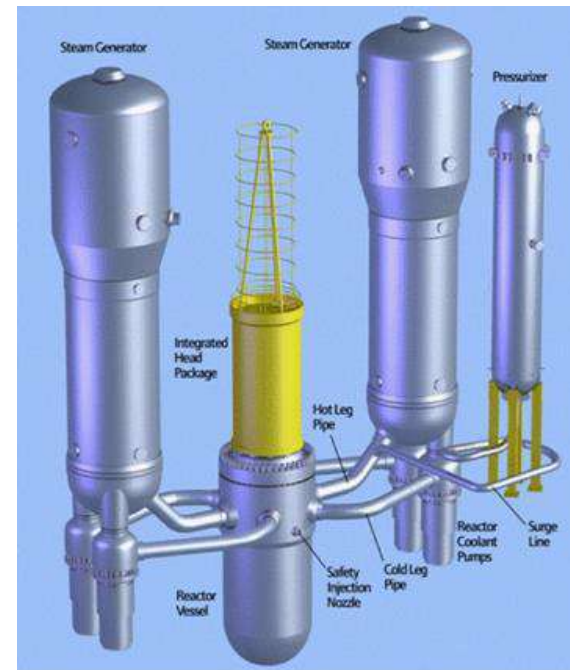
Основные модели вертикальных ПГ

AP-1000 – воплощает современные тенденции развития атомной энергетики, а именно повышение мощности, энергоэффективности и безопасности за счёт внедрения пассивных систем и оптимизации конструкции. Его успешная эксплуатация на ряде АЭС в США и Китае подтверждает востребованность и перспективность вертикальных парогенераторов в новых проектах.

SNP-140 – Парогенератор в проекте CAP-1400 собственной разработки (SNP-140) является самым инновационным решением в мире энергетики. Это вертикальный парогенератор с естественной циркуляцией. Его тепловая мощность составляет около 2020 МВт, что является абсолютным рекордом на сегодняшний день.



AP-1000



SNP-140

Основные критерии сравнения теплообменного оборудования

Параметры использования теплоты

Характеристика	Расчетная формула	Определение
Коэффициент удержания теплоты ϵ_q	$Q_2/Q_1 = 1 - \Delta Q/Q_1$	Отношение количества полезной теплоты, то есть той, что получил второй контур в процессе теплообмена к количеству теплоты, отданной первым контуром (реактором)

Энергетические показатели

Характеристика	Расчетная формула	Определение
Эксергетический КПД	$\eta_e = (E_2/E_1) \times 100\%$	Отражает, какая часть работоспособности (эксергии) подведенного теплового потока была полезно использована, учитывая необратимые потери
Показатель энергетической эффективности EF	$EF = Q_{\text{полезн}} / \delta P_1 + \delta P_2$	Характеризует отношение полезной тепловой мощности к суммарным энергозатратам на прокачку теплоносителей
Критерий Кирпичева	$E_k = Q / A_{\text{п}}$	Характеризует эффективность преобразования работы прокачки теплоносителей в полезную тепловую мощность в теплообменных аппаратах.
Критерий Глазера	Для первого контура: $E_{\Gamma 1} = Q / \delta P_1$ Для второго контура: $E_{\Gamma 2} = Q / \delta P_2$	Характеризует эффективность использования мощности прокачки одного контура теплоносителя для передачи тепловой энергии

* Критерии сравнения описаны в справочнике по теплообменным аппаратам (П.И. Бажан, Г.Е. Каневец, В.М. Селиверстов)

Сравнительный анализ технических характеристик

Параметр	ПГВ-440	ПГВ-1000	ПГВ-1000 МКО	AP-1000	SNP-140	Усоверш. ПГ
Тепловой поток Q, МВт	229	750	828	1700	2020	800
Удельный тепловой поток q, кВт/м ²	88,86	122,65	124,33	146,55	137,73	113
Масса ТА, т	163	321	355	700	807	235
Масса ТЭ, т	28	66,74	100,6	85,39	107,37	83,467
Объем ТА, м ³	190	192	205	400	471	192
Объем ТЭ, м ³	14,26	20	30,26	251,32	317,93	156,74
Общая мощность на прокачку ТН ОР, МВт	0,622	1,835	2,111	6,385	7,371	2,324
Козф. удержания теплоты	0,9297	0,93	0,93	0,935	0,935	0,93
Эксергетический КПД, %	92,6	91,5	92,4	91,5	95,3	92,5
Показатель энергетической эффективности EF	342	380	365	249	256	320
Критерий Кирпичева Ек	0,05	0,054	0,052	0,035	0,036	0,046
Критерий Глазера Ег	773/702	980/700	1049/626	635/458	684/457	697/679
Приведенный коэффициент мощности	35,16/32	39,2/28	41,96/25,05	35,28/25,47	42,75/28,57	34,87/34
Кэффициент теплопередачи k, Вт/(м ² ·К)	4039	4906	4973	8141	8608	5678
Кэффициент использования массы km, Вт/(кг·К)	63,86	93,45	93,29	134,92	156,44	170
Кэффициент использования объема Kv, МВт/(м ³ ·К)	0,055	0,156	0,162	0,236	0,268	0,208
Кэффициент компактности KFV, м ² /м ³	13,5	31,84	32,49	29	31,14	36,68

Объемы теплообменных аппаратов и объемы теплообменных элементов

Парогенератор	Объем Vтэ, м ³	Объем Vта, м ³
ПГВ-440	14,26	190
ПГВ-1000	20	192
ПГВ-1000 МКО	30,26	205
AP-1000	251,32	400
SNP-140	317,93	471
Усовер. ПГ	156,74	192

Удельные массы парогенераторов

ПГВ-440	ПГВ-1000	ПГВ-1000 МКО	AP-1000	SNP-140	Усовер. ПГ
712	428	427	411	399	294
кг/МВт	кг/МВт	кг/МВт	кг/МВт	кг/МВт	кг/МВт

- Лучший результат
- Худший результат
- Характеристики спроектированного ПГ

Бальная система оценивания

Была разработана оригинальная программа оценки парогенераторов любой компоновки. Эксперт задает каждому параметру весовой коэффициент. Определение весовых коэффициентов для объективной оценки производилось при помощи метода линейного ранжирования по формуле Фишберна.

Алгоритм метода ранжирования:

1) Вычисляем показатель важности для критерия k_i по формуле:

$$k_i = n + 1 - i$$

2) Вычисляем сумму показателей важности:

$$k_c = \sum_{i=1}^n k_i = \frac{n(n+1)}{2}$$

3) В конце необходимо вычислить нормированные весовые коэффициенты по формуле:

$$\alpha_i = \frac{k_i}{k_c} = \frac{n + 1 - i}{\frac{n(n+1)}{2}} = \frac{2(n + 1 - i)}{n(n + 1)}$$

Далее программа присваивает парогенератору баллы от 0 до 100 и формирует удобную сводную таблицу.

Распределение весовых коэффициентов

Ранг параметра	Название	Вес параметра	Ранг параметра	Название	Вес параметра
1	Эксергетический КПД	0,133	9	Коэффициент использования объема	0,057
2	Полный тепловой поток	0,124	10	Коэффициент компактности	0,048
3	Удельный тепловой поток	0,114	11	Приведенный коэффициент мощности (1 контур)	0,038
4	Коэффициент теплопередачи	0,105	12	Приведенный коэффициент мощности (2 контур)	0,029
5	Коэффициент энергетической эффективности	0,095	13	Критерий Глазера (1 контур)	0,019
6	Коэффициент удержания тепла	0,086	14	Критерий Глазера (2 контур)	0,010
7	Критерий Кирпичева	0,076			
8	Коэффициент использования массы	0,067			

Пример работы программы

Работа программы на примере расчета ПГВ-1000

Сводная таблица показателей парогенератора:	
Параметр	Значение
q	122.6500
mTA	321.0000
mTE	66.7400
VTA	192.0000
VTE	20.0000
P	1.8350
k_heat	0.9300
eta_ex	91.5000
energy_eff	380.0000
K_kripichev	0.0540
Eg1	980.0000
Eg2	700.0000
Wpr1	39.2000
Wpr2	28.0000
k	4906.0000
km	93.4500
Kv	0.1560
KFV	31.8400

Оценка эффективности по параметрам:			
Параметр	Значение	Баллы (0-100)	Взвешенный вклад
Q	750.0000	26.19	3.25
q	122.6500	65.81	7.50
k_heat	0.9300	40.00	3.44
eta_ex	91.5000	10.00	1.33
energy_eff	380.0000	87.50	8.31
K_kripichev	0.0540	84.62	6.43
Eg1	980.0000	76.00	1.44
Eg2	700.0000	85.71	0.86
Wpr1	39.2000	61.33	2.33
Wpr2	28.0000	38.46	1.12
k	4906.0000	18.12	1.90
km	93.4500	27.88	1.87
Kv	0.1560	46.09	2.63
KFV	31.8400	72.80	3.49

Итоговая оценка эффективности: 45.90 из 100 баллов

Все, заданные пользователем показатели ПГ

Детальная оценка каждого показателя

Кол-во баллов, набранное парогенератором

Распределение баллов между парогенераторами

Парогенератор	Количество набранных баллов
ПГВ-440	27,59
ПГВ-1000	45,90
ПГВ-1000 МКО	48
Усовершенствованный вертикальный ПГ	48,65
AP-1000	50,38
SNP-140	67,92

Программа подтвердила, что рассчитанный усовершенствованный ПГ превосходит парогенераторы типа ПГВ и близок к характеристикам парогенератора AP-1000.

* Ограниченность методики – не учитывает реалии использования ПГ при выставлении балльной составляющей.

Выводы

- 1) В результате работы сконструирован оригинальный вертикальный ПГ для реакторной установки ВВЭР-С в двух-петлевой компоновке. Конструкция объединяет преимущества как горизонтальных, так и вертикальных ПГ.
- 2) Проведен сравнительный анализ парогенераторов с РУ типа ВВЭР и PWR по ряду общепризнанных в теплотехнике критериев сравнения. Показано, что вертикальные парогенераторы имеют заметные преимущества перед горизонтальными по ряду параметров сравнения.
- 3) Разработана оригинальная программа на языке Python, позволяющая ранжировать ПГ с учетом различных технических характеристик и параметров сравнения с учетом весовых коэффициентов по методу линейного ранжирования по формуле Фишберна. Показано, что разработанный ПГ по своим характеристикам превосходит горизонтальные ПГ и приближается к лучшим зарубежным вертикальным ПГ.
- 4) Результаты сравнения не являются абсолютными, т.к. не учитывают некоторые параметры эксплуатации (например, наличие опыта по обслуживанию и ремонта ПГ, готовность промышленности к изготовлению и обслуживанию новых моделей), а также более тонких технических характеристик (например, вибростойкость; влияние на строительные объемы; влияние на процессы и параметры безопасности (запас воды) и т.д.). С учетом этих дополнительных факторов отечественные горизонтальные ПГ выглядят вполне конкурентоспособными.



Спасибо за внимание!

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЯЖЁЛЫХ АВАРИЙ НА АЭС: от «что, если» к «как предотвратить»

Моделирование тяжёлых аварий — это фундаментальный инструмент для обеспечения безопасности современных АЭС. С помощью сложных расчётных кодов инженеры виртуально воспроизводят запроектные сценарии, такие как LOCA (потеря теплоносителя) или полное обесточивание станции (SBO). Эти модели позволяют проследить всю цепочку событий: от повреждения активной зоны и плавления топлива (образования кориума) до его взаимодействия с корпусом реактора и бетоном защитной оболочки.

Ключевая задача такого моделирования — не просто констатировать возможные последствия, а найти пути их предотвращения и минимизации. Это требует глубокого понимания сложной физики процессов, таких как моделирование взаимодействия расплава топлива с бетоном (MFCI), где анализируются химические реакции, теплообмен и образование газов, а также моделирование парового взрыва — одного из самых разрушительных динамических явлений при контакте расплавленного кориума с водой.

Работа в это направлении требует отличного знания вычислительной техники и вычислительных методов. Работа с тяжеловесными CAE-системами (например, ANSYS CFX, STAR-CCM+) и специализированными кодами для анализа безопасности (MELCOR, RELAP/SAPHIRE) требует уверенных навыков работы в операционных системах семейства Linux, умения писать скрипты на языках Python или MATLAB для автоматизации расчётов и обработки данных, а также владения инструментами для визуализации больших объёмов данных.

Для студентов бакалавриата эта область открывает широкие возможности для самореализации. Успешная работа в этом направлении требует не только навыков программирования, но и фундаментальных знаний в области теплофизики и гидродинамики. Это прямой путь к участию в реальных научно-исследовательских проектах и формированию компетенций, востребованных в ведущих отраслевых организациях.

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Институт тепловой и атомной энергетики
Кафедра атомных электрических станций и установок

Выпускная квалификационная работа
на тему:

**Расчет вертикального парогенератора для АЭС с ВВЭР-1200.
Взаимодействие высокотемпературного расплава с водой в ходе
тяжелой аварии на АЭС**

Студент: Музыченко Владимир Федорович

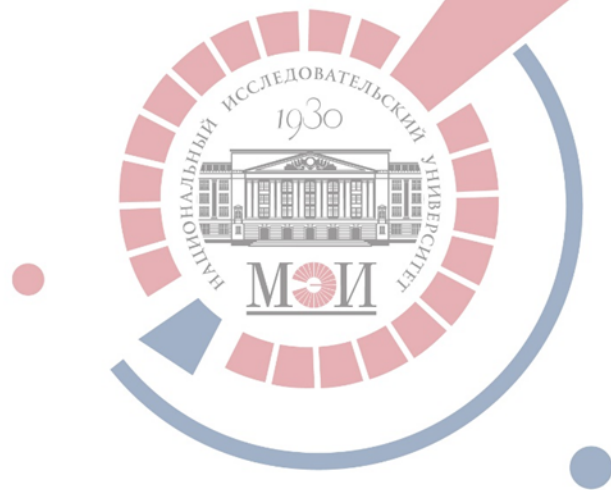
Группа: ТФ-11-21

Научный руководитель: Мелихов Владимир Игорьевич

2025

Актуальность исследования определяется необходимостью повышения безопасности и эффективности парогенераторов для современных АЭС в условиях высоких требований к ядерным установкам.

Цель исследования: проектирование вертикального парогенератора ПГВ-1000МКП для сравнения с прототипом, а также исследование поведения высокотемпературного расплава при его взаимодействии с водой в условиях тяжелой аварии.



Исходные данные



Наименование параметра	Значение
Тип	Вертикальный
Теплоноситель	Вода
Давление теплоносителя, МПа	16,2
Температура теплоносителя на входе, °С	330
Температура теплоносителя на выходе, °С	298
Рабочее тело	Вода
Давление пара, МПа	7,1
Температура питательной воды, °С	225

Результаты теплового расчета



Величина	Значения			
Вариант	1	2	3	4
Скорость теплоносителя, м/с	3	3,5	4	5
Тепловая мощность, МВт	812,43			
Фактическая площадь теплопередающей поверхности, м ²	10245,575	9983,698	9762,409	9455,299
Средняя длина одной трубы, м	11,105	12,585	14,199	17,302
Масса теплообменных труб, т	121,717	118,606	115,977	112,329

Результаты конструкционного расчета



Величина	Значения			
	1	2	3	4
Вариант	1	2	3	4
Скорость теплоносителя, м/с	3	3,5	4	5
Окончательное число теплообменных трубок, шт	20253	17415	15093	11997
Наружный диаметр обечайки корпуса, м	3,741	3,516	3,297	3,105
Длина корпуса парогенератора, м	12,101	11,402	10,210	9,628
Масса парогенератора, т	262,513	249,320	218,421	199,853

Результаты гидродинамического расчета



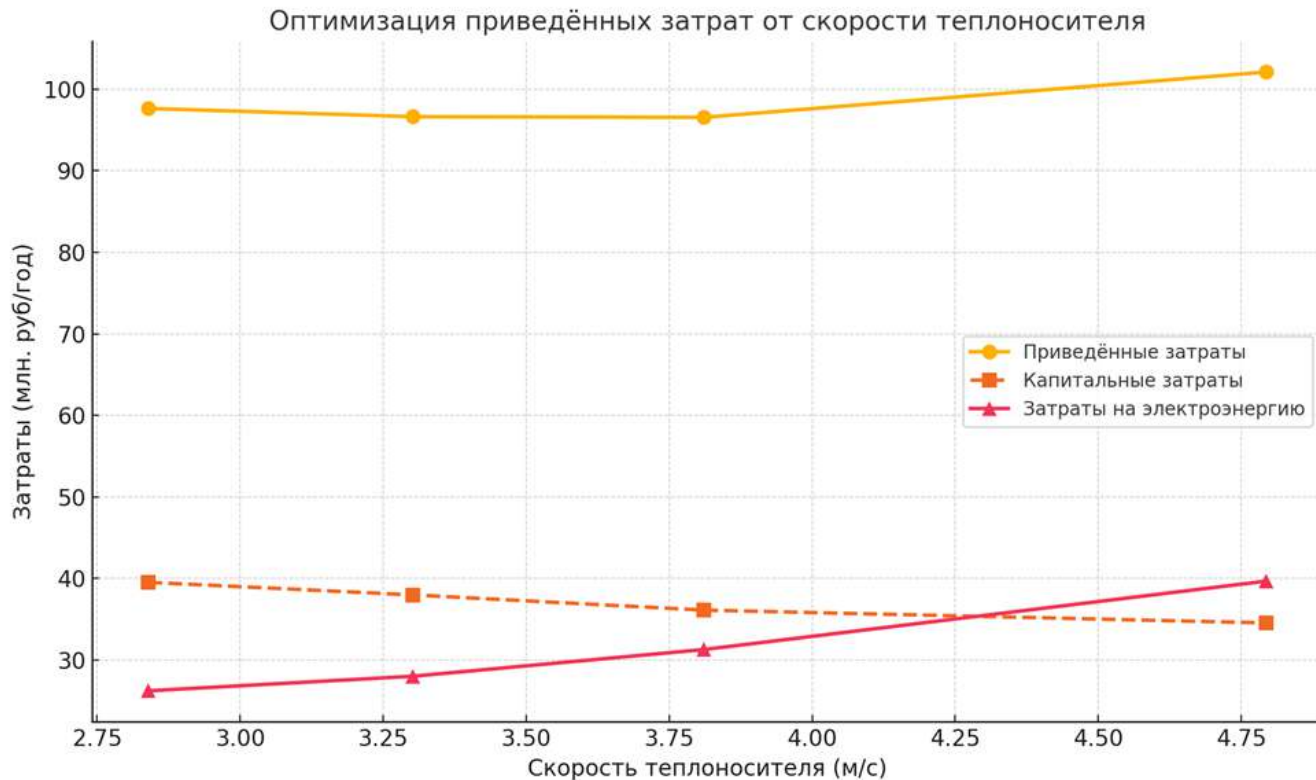
Величина	Значения			
Вариант	1	2	3	4
Скорость теплоносителя, м/с	3	3,5	4	5
Гидравлическое сопротивление первого контура, кПа	310,35	333,96	376,93	487,41
Гидравлическое сопротивление второго контура, кПа	44,262			
Мощность насоса для первого контура, кВт	2801,5	3014,2	3403,6	4402,1
Мощность насоса для второго контура, кВт	323,0			

Результаты экономического расчета



Величина	Значения			
Вариант	1	2	3	4
Скорость теплоносителя, м/с	3	3,5	4	5
Стоимость парогенератора, млн. руб	329,564	316,660	301,150	288,092
Капитальная составляющая приведенных затрат, млн.руб/год	39,548	37,999	36,138	34,571
Составляющая приведенных затрат на электроэнергию, млн.руб./год	26,246	28,032	31,303	39,691
Приведенные затраты, млн.руб/год	97,629	96,621	96,533	102,092

Выводы по расчету ПГ



Сравнение с горизонтальным прототипом



Характеристика	Расчитанный ПГ	ПГВ-1000МКП
Тепловая мощность, МВт	812,43	800
Давление теплоносителя, МПа	16,2	16,2
Температура теплоносителя на входе/выходе, °С	330/298	329/298
Давление генерируемого пара, МПа	7,1	7,0
Температура ПВ, °С	225	225

Характеристика	Расчитанный ПГ	ПГВ-1000МКП
Внутренний диаметр корпуса, м	3,916	4,2
Площадь поверхности теплообмена, м ²	9983,698	6105
Количество теплообменных труб, шт	17415	10978
Средняя длина труб, м	12,585	11,1
Трубы теплопередающей поверхности, мм	16x1,5	16x1,5

Теоретические основы парового взрыва



Последствия парового взрыва

Повреждение корпуса реактора

Разрушение внутренних элементов

Нарушение герметичности оболочки

Выход радиоактивности

Меры по предотвращению условий инициирования

Стабильная стратификация – формирование устойчивого водяного слоя над расплавом для предотвращения перемешивания и пассивного охлаждения

Рассеивание энергии – конструктивные решения для управляемого охлаждения расплава и минимизации риска взрывного парообразования

Мониторинг и контроль – непрерывное наблюдение параметров активной зоны для своевременного выявления отклонений

ПО “FlowVision”



FlowVision – это многофункциональный программный комплекс для решения задач вычислительной гидродинамики (Computational Fluid Dynamics, CFD). Программа предназначена для моделирования течений жидкостей и газов, процессов теплопередачи, горения, а также других сопряжённых физических явлений.



Расчетная область

Параметры расчетной области:

Длина – 750 мм;

Высота – 15 мм;

Угол сектора – 2° .

Параметры пузырька:

Начальный радиус – 2 мм;

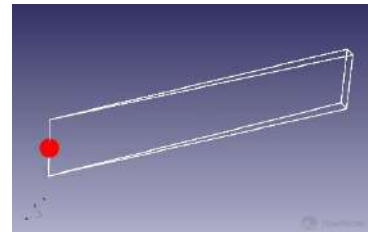
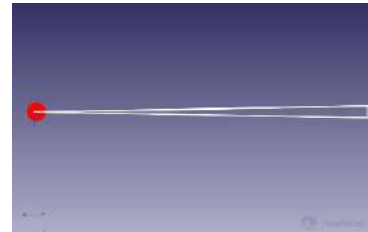
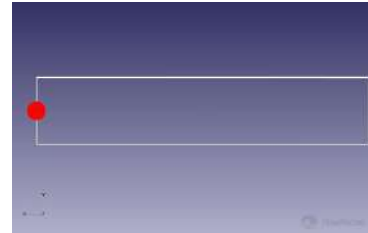
Давление – 4,53 МПа;

Температура – 1200К.

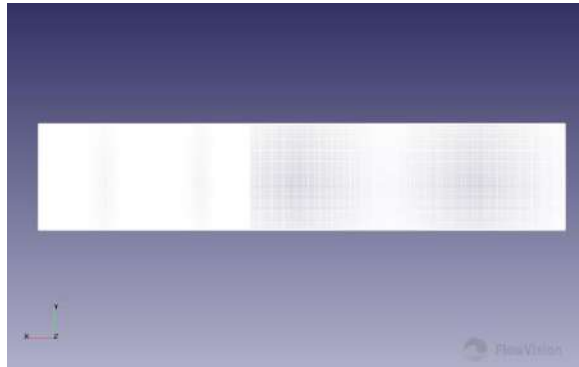
Параметры воды:

Давление – 0,23 МПа;

Температура – 298К.



Расчетная сетка

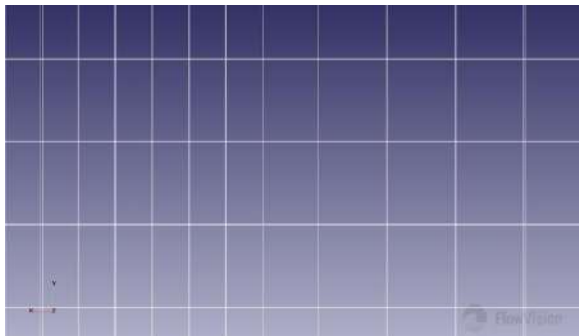


Параметры первой области:

Длина – 300 мм;

Высота – 15 мм;

Разрешение расчетной сетки – 375x100



Параметры второй области:

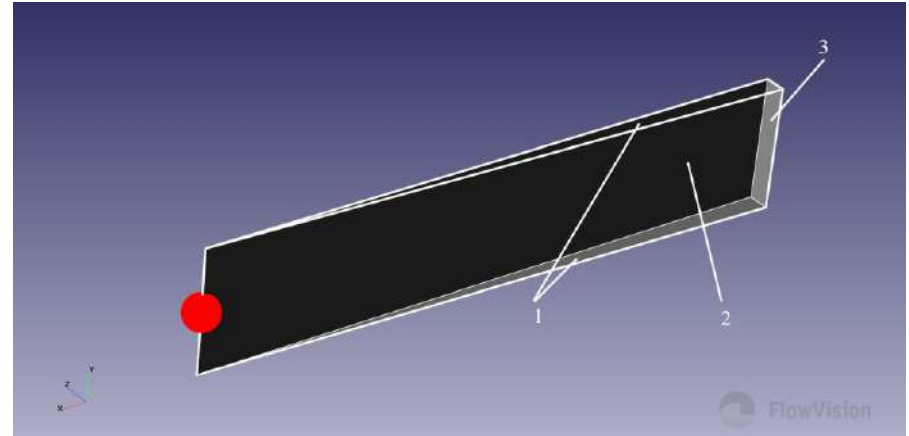
Длина – 450 мм;

Высота – 15 мм;

Разрешение расчетной сетки – 300x100

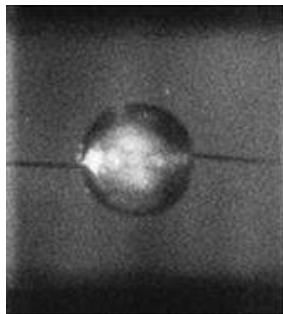
Граничные условия

1. Стенка – непроницаемая твердая граница;
2. Симметрия – соответствует физической симметрии;
3. Свободный выход – сохраняет постоянное давление среды, имитация открытого объема.

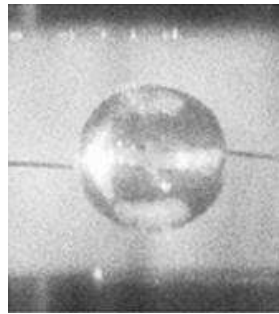


Сравнение полученных результатов

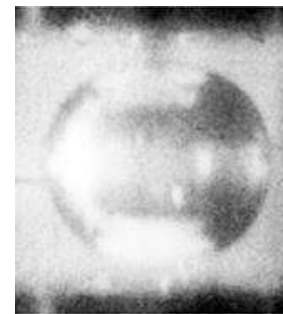
0,1219 мс



0,2195 мс



0,78 мс



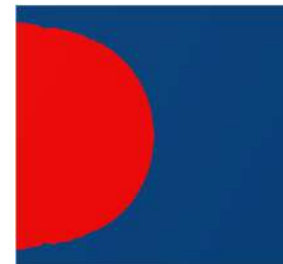
0,0035 мс



0,1850 мс



0,5530 мс



Сравнение полученных результатов

1,2927 мс



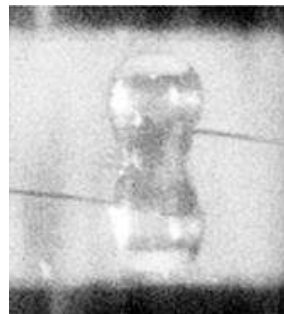
1,4634 мс



1,5853 мс



1,6341 мс



1,6829 мс



1,7073 мс



0,9510 мс



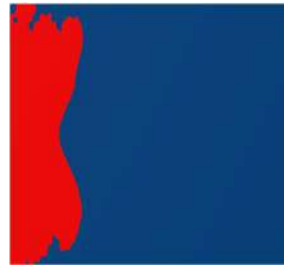
1,0665 мс



1,175 мс



1,25 мс



1,32 мс



1,3370 мс



Моделирование процесса



Выводы



1. Был проведен расчет вертикального парогенератора типа ПГВ-1000МКП и выбрана оптимальная скорость теплоносителя $w=3,5$ м/с.
2. Рассмотрен вопрос взаимодействия высокотемпературного расплава с охладителем.
3. Было проведено моделирование схлопывания пузырька вблизи твердых поверхностей.



Спасибо за внимание!



Национальный исследовательский университет
«Московский энергетический институт»



Презентация к выпускной квалификационной работе
на тему:

Оценка интенсивности взаимодействия расплавленного топлива с водой при тяжелой аварии на РИТМ-200.

Выполнила: Святкина В.А.
Группа ТФ-11-21

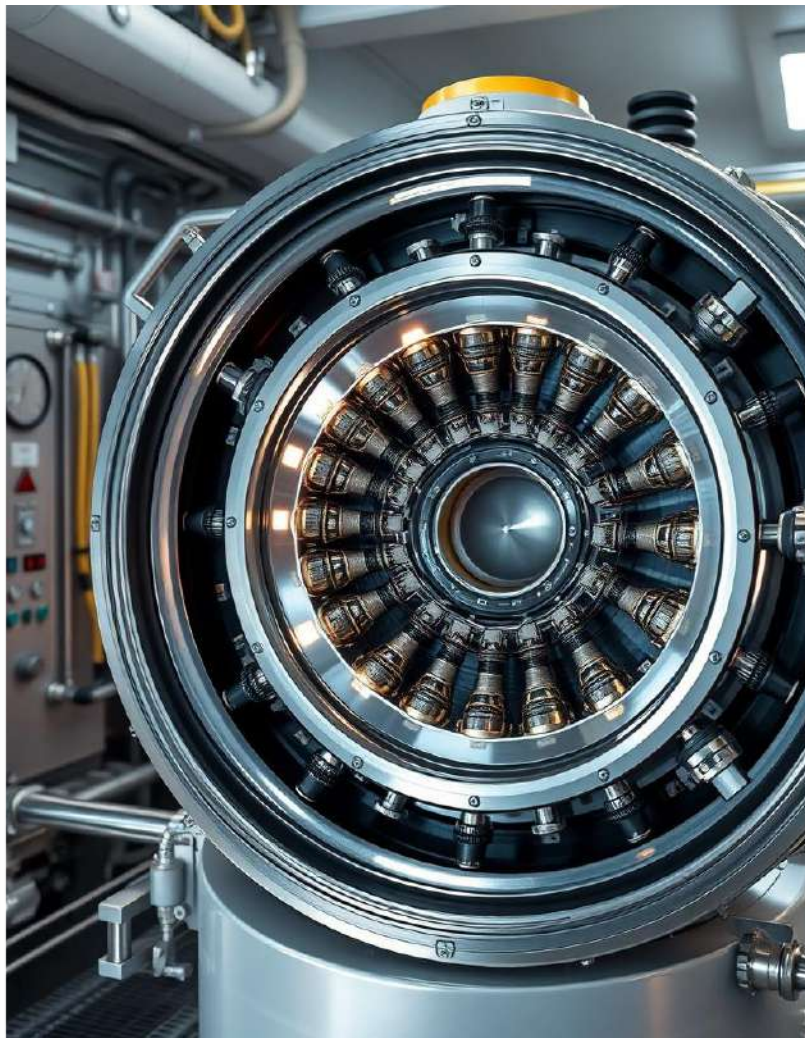
Научный руководитель: д.ф.-м.н. профессор Мелихов О.И.

2025

Значимость исследований для развития атомной энергетики

Проект РИТМ-200 предназначен для энергоснабжения удалённых территорий. В Якутии на данный момент проводятся подготовительные работы. Обеспечение безопасности требует точного моделирования тяжёлых аварий, что особенно актуально для АСММ.





Технические особенности станции и активной зоны

Особенности конструкции и циркуляции теплоносителя

АСММ с РИТМ-200 разработан на базе проверенного судового реактора с коллекторной схемой теплоносителя, совмещающей принудительную и естественную циркуляцию. Такая схема критична для аварийного отвода тепла и надежности работы технологического блока.

Компоновка активной зоны и материаловое обеспечение

Активная зона включает 199 тепловыделяющих сборок в кассетной структуре с использованием современных материалов и конструктивных решений для обеспечения эффективности и безопасности, включая уникальные сплавы и распределение компонентов.

Геометрические параметры парогенерирующего блока РИТМ-200

Участок	Объем воды (м ³)	Высота (м)	Сечение (м ²)
Межканальное пространство а.з.	0,39	1,65	0,18
Пространство над средней плитой БТУ	2,49	1,359	1,77
Межкассетное пространство ПГ	2,33	2,58	0,75
Пространство сливного коллектора	0,91	0,694	–
Донное пространство ПГБ	0,27	0,242	–
Суммарный объем	23,56	–	–

Объемы воды, высота и проходное сечение ключевых участков первого контура обеспечивают оптимальный теплообмен и безопасность. Сбалансированные объемы и геометрия обеспечивают надежное охлаждение и стабильность при аварийных режимах.

Материальный состав активной зоны и конструктивные материалы

В активной зоне содержится 4685,3 кг топлива на основе диоксида урана и силумина, с основными изотопами урана-235 (695 кг) и урана-238 (2932,8 кг).

01

Использование гадолиния (132,9 кг) и титаната диспрозия (74,5 кг) повышает нейтронную эффективность и управляемость реакцией.

03

Конструкционные и антикоррозионные компоненты изготовлены из сплавов 42ХНМ (1759,9 кг), Э110 (1181,5 кг) и Э635 (64 кг), обеспечивая сохранность конструкции при высоких нагрузках.

02

Карбид бора (127,7 кг) и нержавеющая сталь 08Х18Н10Т (130,3 кг) отвечают за дополнительные защитные и функциональные свойства зоны.

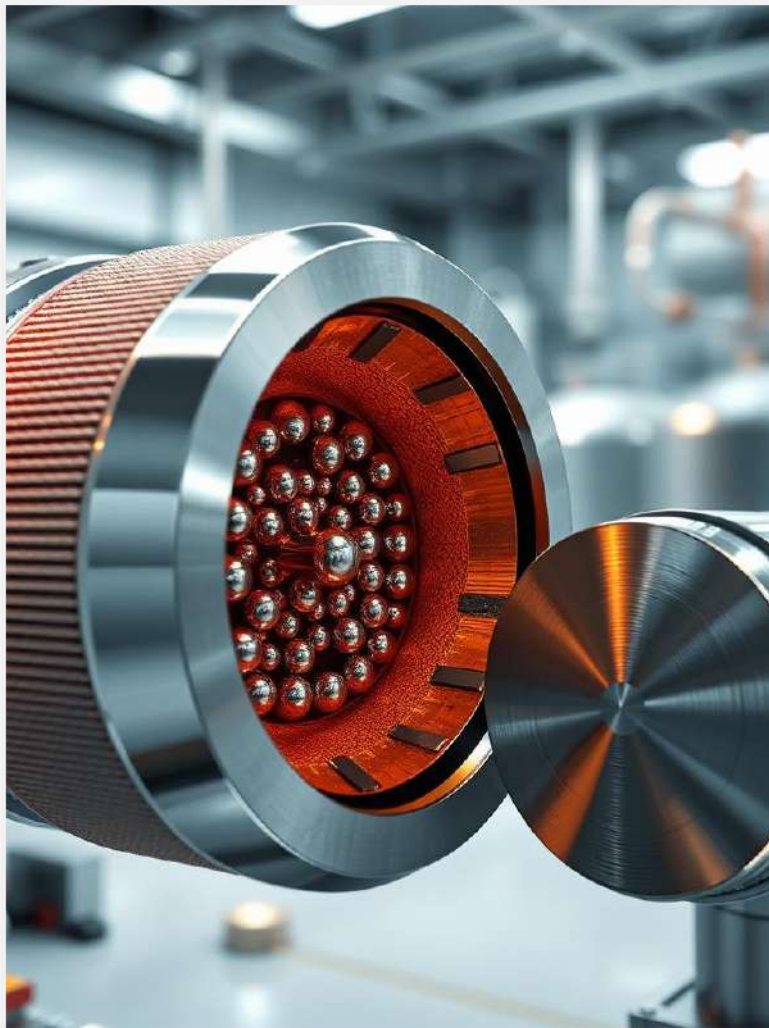
04

Классификация и характеристики ТВС в активной зоне РИТМ-200

Параметр	ТВС-1	ТВС-2	ТВС-3
Число ТВС	61	78	60
Твэлы в ТВС	66	69	72
Высота активной части, мм	1650	1650	1650
Диаметр активной зоны, мм	1566,2	1566,2	1566,2
Материал оболочки	42ХНМ	42ХНМ	42ХНМ
Отличительные элементы	СВП, вытеснители	СВП	СВП, вытеснители

Три типа ТВС различаются числом элементов и конструктивными параметрами, оптимизируя распределение тепла в активной зоне.

Оптимизированная конструкция ТВС обеспечивает стабильное и эффективное тепловыделение по всей активной зоне.



Материалы и инновационные решения для ТВЭЛов

Оболочки ТВЭЛов выполнены из устойчивого к коррозии и высоким температурам сплава 42ХНМ, способного выдерживать до 1350°С, а топливо представляет собой металлокерамическое сочетание UO₂ в силуминовой матрице.

Компенсаторы давления из стали 12Х18Н10Т обеспечивают стабильность конструкции при термических нагрузках. Доля урана-235 достигает 19,5 %, что повышает эффективность и надежность топлива в условиях тяжелых аварий.

Особенности стержней выгорающего поглотителя (СВП)



1 СВП имеют оболочки из сплава 42ХНМ диаметром 6,9 мм и толщиной 0,3 мм, со специально подобранным поглощающим материалом на основе оксидов гадолиния, ниобия и циркония (КГНЦ) или борированного сплава Э110Б43.

2 Распределение СВП в ТВС учитывает аксиальное размещение: КГНЦ в периферийных рядах, борированный сплав по окружности вытеснителя, обеспечивая эффективный нейтронный контроль.

3 Существуют пять типов СВП с разными концентрациями гадолиния и высотами поглощающих слоев, адаптированных для управления кривой выгорания топлива.

4 Форма и состав оболочек критично влияют на безопасность и эффективность активной зоны, способствуя контролю реактивности на всех этапах эксплуатации.

Циркуляция теплоносителя и меры аварийной безопасности

01

Коллекторная схема сочетает принудительный и естественный ток теплоносителя: насосы (ЦНПК) перемещают нагретую жидкость через трубную систему парогенератора, обеспечивая эффективный теплообмен и стабильную работу в штатном режиме.

02

При отключении насосов или парогенераторов установлены обратные клапаны, предотвращающие обратное течение, а специальные отверстия с клапанами минимизируют заторы в естественной циркуляции, что гарантирует надежность системы даже при нескольких отказах.



Основные сценарии тяжелых аварий на РИТМ-200

Сценарий 1: Разрыв трубопровода DN65 с истечением теплоносителя через сужающее устройство DN18; отключение всех насосов; подача воды осуществляется пассивными системами ГА, ЕГА и неаварийного КД.

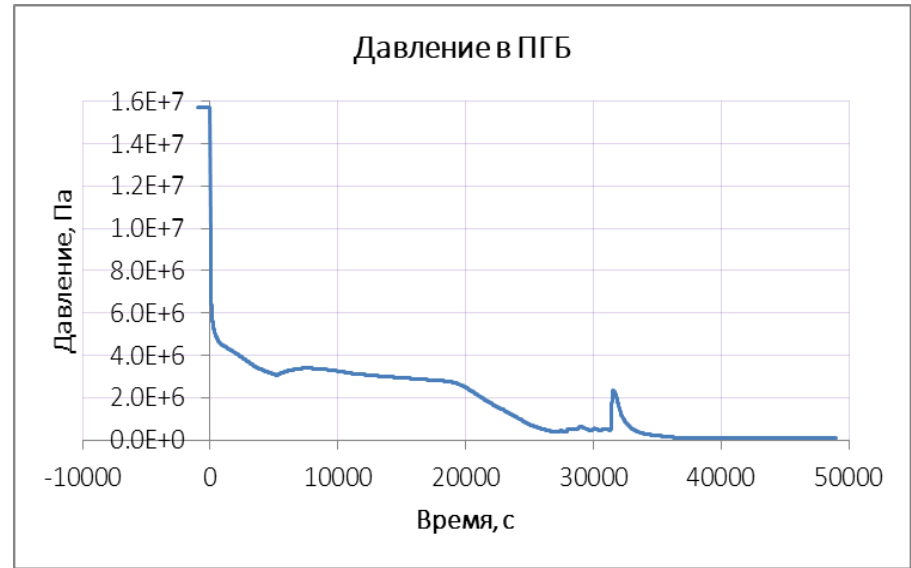
Сценарий 2: Аналогичный разрыв при работе реактора на пониженном уровне мощности с теми же условиями подачи воды и отключения насосов.

Сценарий 3: Полный отказ внешних систем и арматуры; подача воды идет только из неаварийного контролирующего дозатора (КД) с гидравлическим соединением ГА и ЕГА; все насосы отключены.

Динамика давления и выброса водорода при аварии (сценарий 1)

Максимальный расход теплоносителя в течение начальных секунд аварии достигает 11,2 кг/с, затем падает, совпадая с резким снижением давления в первом контуре.

Резкое падение давления и высокий выброс водорода до 13,1 кг свидетельствуют о значительной деградации материалов и высокой парообразующей активности в аварийной ситуации.

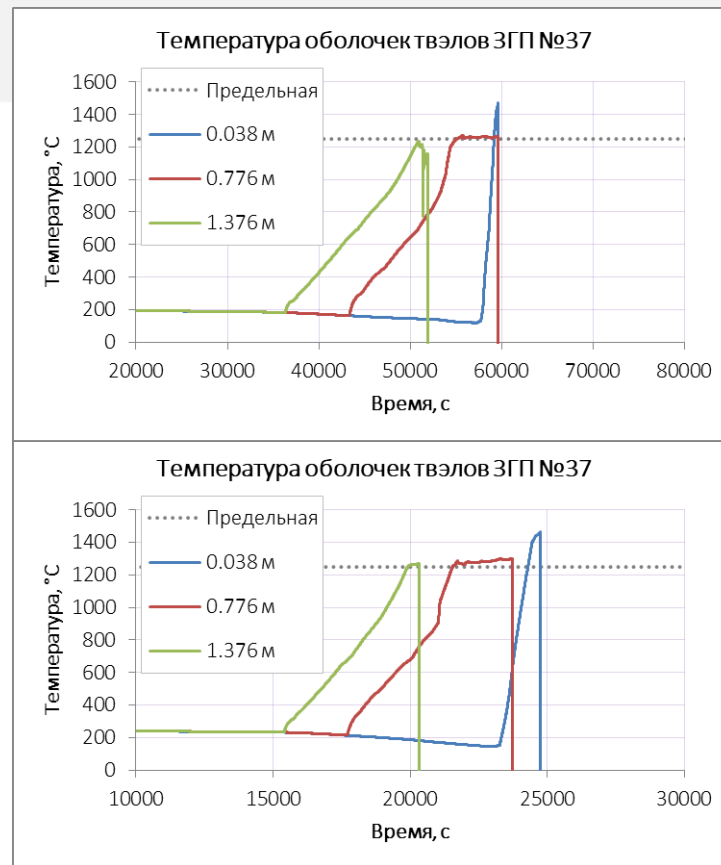


Расчёты по сценарию №1 с использованием кода СОКРАТ,

Температурные характеристики и водно-паровая динамика (сценарии 2 и 3)

Температура оболочек ТВЭЛов достигает критических значений при снижении уровня воды, что сопровождается пиковыми выбросами водорода и пара, ухудшая безопасность реактора.

Одинаковая динамика температур и выбросов водорода в сценариях 2 и 3 указывает на схожие механизмы деградации при разных начальных условиях.



Фазовые превращения и образование зоны расплава

01

В аварийных условиях происходит расплав материалов активной зоны: UO_2 , силумин, сплавы хромоникелевые и циркониевые образуют гомогенизированную расплавленную массу.

02

Расплав может проникать в нижнюю часть корпуса через центральное проплавление опорной плиты или через боковое проплавление стенки шахты реактора, формируя ванну расплава.

03

Различная морфология слоя пористого дебриса и характер фрагментации при контакте расплава с водой определяют величину и интенсивность парового взрыва.

Физические процессы при контакте расплава с водой: предпосылки парового взрыва

Тепловые и механические эффекты контакта

Интенсивная теплопередача от горячего расплава приводит к быстрой фрагментации капель и увеличению площади контакта, ускоряя вскипание и расширение пароводяной смеси.

Модель термической детонации

Широкое распространение волны давления объясняется вспышкообразным увеличением паросодержания, что аналогично процессам термической детонации многофазной смеси.



Математическая модель и метод адиабаты Гюгонио для оценки давления

Расчёт учитывает фазовые переходы и термодинамическое равновесие, определяя параметры точки Чепмена-Жуге: давление и скорость детонационной волны.

Метод адиабаты Гюгонио основан на уравнениях сохранения массы, импульса и энергии для многофазной смеси расплава, воды и пара.

Модель реализована в программном коде на Фортране-90, адаптированном для работы с двух- и однофазными состояниями воды в зоне взаимодействия.

Материальный состав и свойства расплава

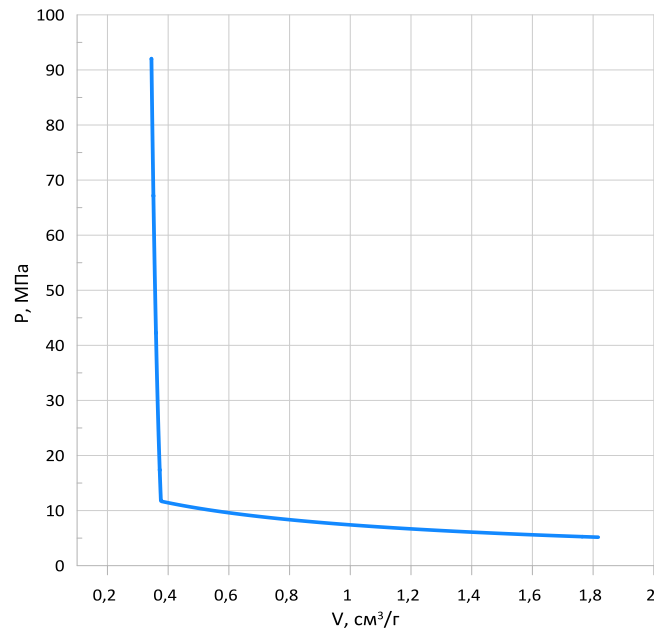
Материал	Доля (%)	Температура (К)	Плотность (кг/м ³)
UO ₂	50	1900	7400
42ХНМ	22		
Э110	14		
Al+Si	7		
Gd	2		
08X18H10T	2		
B ₄ C	2		
Dy ₂ O ₃ +TiO ₂	1		
Э635	1		

Основные составляющие и физические параметры расплавленных материалов активной зоны, использованные в моделировании парового взрыва. Расплав характеризуется высокой плотностью и температурой, что существенно влияет на динамику парового взрыва и связанные с ним нагрузки.

Адиабата Гюгонио: связь давления и фазового состава

Изменение давления в зависимости от удельного объёма смеси и доли пара демонстрирует значительную чувствительность к фазовому составу и параметрам пароводяной среды.

Максимальное давление до 63,6 МПа свидетельствует о высоком риске повреждений при паровых взрывах в АСММ с РИТМ-200.



60 Мпа- максимальное давление, выявленное в ходе расчётов, превышает проектные пределы корпуса реактора и требует усиления защитных мер.



Это значение подчеркивает необходимость учета экстренных нагрузок при проектировании АСММ с РИТМ-200 для предотвращения разрушений.

Безопасностные выводы и практические рекомендации для проектирования

Высокий риск нарушения герметичности корпуса обусловлен детонационными давлениями, достигающими значений порядка 60 МПа при тяжелых авариях.

01

Проектирование должно учитывать экстремальные нагрузки путем внедрения многоуровневых защитных барьеров и систем аварийного охлаждения.

03

Современные расчетные инструменты должны быть адаптированы с учётом специфики АСММ с РИТМ-200 и верифицированы экспериментально.

02

Рекомендуется интегрировать системы мониторинга состояния активной зоны для опережающего управления безопасностью в режиме реального времени.

04



Заключение и перспективы повышения безопасности АСММ с РИТМ-200

Анализ показал критическую роль модели адиабаты Гюгонио в оценке давления парового взрыва, подчеркивая необходимость комплексного подхода и экспериментальной валидации для повышения безопасности станции.



ЯДЕРНЫЕ ТОПЛИВНЫЕ ЦИКЛЫ И ЗАМЫКАНИЕ ЯТЦ: ключ к ресурсной независимости

Эффективность и устойчивость атомной энергетики напрямую зависят от выбранного ядерного топливного цикла (ЯТЦ). В настоящее время в мире доминирует открытый (однократный) цикл, где ядерное топливо проходит через реактор один раз, после чего отработавшее ядерное топливо (ОЯТ) рассматривается как радиоактивный отход и подлежит захоронению. Этот подход, будучи технически простым, создаёт проблему накопления большого объёма долгоживущих отходов и неэффективно использует ценный энергетический ресурс, содержащийся в ОЯТ.

Перспективным направлением развития является замкнутый ядерный топливный цикл. Его суть заключается в рециклинге — переработке отработавшего топлива для извлечения неиспользованного урана и наработанного в реакторе плутония. Эти материалы затем используются для создания нового смешанного

оксидного (МОКС-) или нитридного (РЕМИКС) топлива, которое снова отправляется в реактор.

Замыкание ЯТЦ решает сразу несколько стратегических задач:

Ресурсная база: многократно расширяет сырьевую базу атомной энергетики, позволяя использовать уже добытый уран повторно.

Обращение с отходами: значительно сокращает объём и радиотоксичность высокоактивных отходов, подлежащих окончательному захоронению.

Экономика: снижает потребность в добыче и обогащении природного урана.

Эта технология является основой проектов реакторов на быстрых нейтронах, которые способны «дожигать» минорные актиниды и эффективно работать в связке с переработкой ОЯТ, создавая по-настоящему безотходную и экологически чистую двухкомпонентную ядерную энергетическую систему.

Национальный исследовательский университет
“Московский энергетический институт”

Презентация к выпускной квалификационной работе
на тему:

**“Расчет парогенератора для АЭС с ВВЭР-1000.
Обращение с отработавшим ядерным топливом
реактора ВВЭР-1000”**

Выполнила: Лебедеико Я.С.

ТФ-12-21

Научный руководитель: к.г.н., доцент Хвостова М.С.

2025

Актуальность, цели и задачи

Актуальность: необходимость повышения надежности и безопасности АЭС, а также совершенствование обращения с отработавшим ядерным топливом (ОЯТ)

Цель: проектирование вертикального парогенератора и анализ обращения с ОЯТ для АЭС с ВВЭР-1000

Задачи: расчеты (тепловой, конструкционный, гидродинамический, экономический), рассмотрение технологий обращения с ОЯТ

Исходные данные



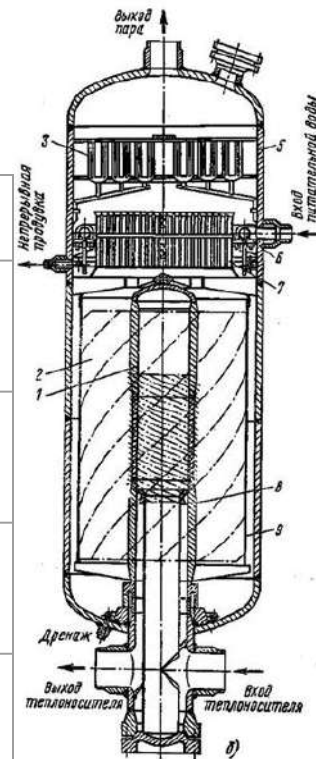
Теплоноситель	Вода под давлением		
Давление теплоносителя	15,7 МПа		
Температура теплоносителя на входе и выходе	320°C // 290°C		
Рабочее тело	Вода		
Давление генерируемого пара	6,27 МПа		
Температура питательной воды	200°C		
Скорость теплоносителя	4,21 м/с	3,88 м/с	5,67 м/с
Паропроизводительность	408,33 кг/с		
Расход	21200 м ³ /ч		

Особенности вертикального парогенератора



- Корпус ориентирован вертикально;
- U-образные теплообменные трубки;
- Компактное размещение парогенератора;
- Предпочтительны с точки зрения радиационной безопасности.

Преимущества	Недостатки
Снижение объемов строительных работ и расхода конструкционных материалов	Изготовление более трудоемкое и затратное
Отсутствие застойных зон во втором контуре	Сложность ремонта и обслуживания
Равномерный теплообмен (одинаковая длина труб, эвольвентная геометрия)	Вибрации в U-образных пучках, что приводит к истиранию трубок
Повышенная эффективность влагоотделения (двухступенчатая сепарация)	Отсутствие в России необходимости замены горизонтальных ПГ на вертикальные



Тепловой расчет



	1 вариант: 4,21 м/с	2 вариант: 3,88 м/с	3 вариант: 5,67 м/с
Полная тепловая мощность, МВт	78,77		
Средний температурный напор, °С	27,96 20,73		
Площадь испарительного участка, м ²	3325	3479	3003
Площадь экономайзерного участка, м ²	962	975	886
Суммарная площадь теплопередающей поверхности, м ²	5144,4	5345	4667

Конструкционный расчет



	1 вариант: 4,21 м/с	2 вариант: 3,88 м/с	3 вариант: 5,67 м/с
Масса труб, т	44,67	46,41	40,52
Длина одной трубы, м	8,13	7,85	9,92
Длина труб теплопередающей поверхности, м	128000	133000	116000
Масса парогенератора, т	217,147	222,585	194,733

Гидродинамический расчет



Цель гидродинамического расчета ПГ – определение гидравлических сопротивлений движению теплоносителя и рабочего тела и затрат мощности на их преодоление.

	1 вариант: 4,21 м/с	2 вариант: 3,88 м/с	3 вариант: 5,67 м/с
Гидравлическое сопротивление первого контура, кПа	159,29	127,34	216,32
Гидравлическое сопротивление второго контура	94,72		
Мощность насоса для первого контура, мВт	1,26	1,09	1,57
Мощность насоса для второго контура, кВт	64,2		

Экономический расчет



Показатель	1 вариант: 4,21 м/с	2 вариант: 3,88 м/с	3 вариант: 5,67 м/с
Затраты на электроэнергию, тыс. руб	787,9	686,7	972,3
Эксплуатационные издержки, тыс. руб	808,1	707,5	990,0
Приведенные затраты, тыс. руб	833,2	733,2	1012,0
Стоимость парогенератора, млн. руб	209,085	214,673	183,188

Скорость 4,21 м/с выбрана оптимальной на основе сравнения затрат. Она обеспечивает наименьшие издержки и затраты на электроэнергию при сохранении технической эффективности. Вариант 3,88 м/с требует слишком большого и более дорогого парогенератора, а 5,67 м/с — избыточно дорог по приведенным затратам.

Специальный вопрос: обращение с ОЯТ ВВЭР-1000



ВВЭР-1000 — реактор с водой в качестве замедлителя и теплоносителя, активная зона в герметичном корпусе под давлением. В настоящий момент в России реакторы с ВВЭР-1000 эксплуатируются на:

- Балаковская АЭС;
- Калининская АЭС;
- Нововоронежская АЭС (5 энергоблок);
- Ростовская АЭС;

Топливо — UO_2 в циркониевой оболочке (ТВЭЛ), обогащение 3–5 %.

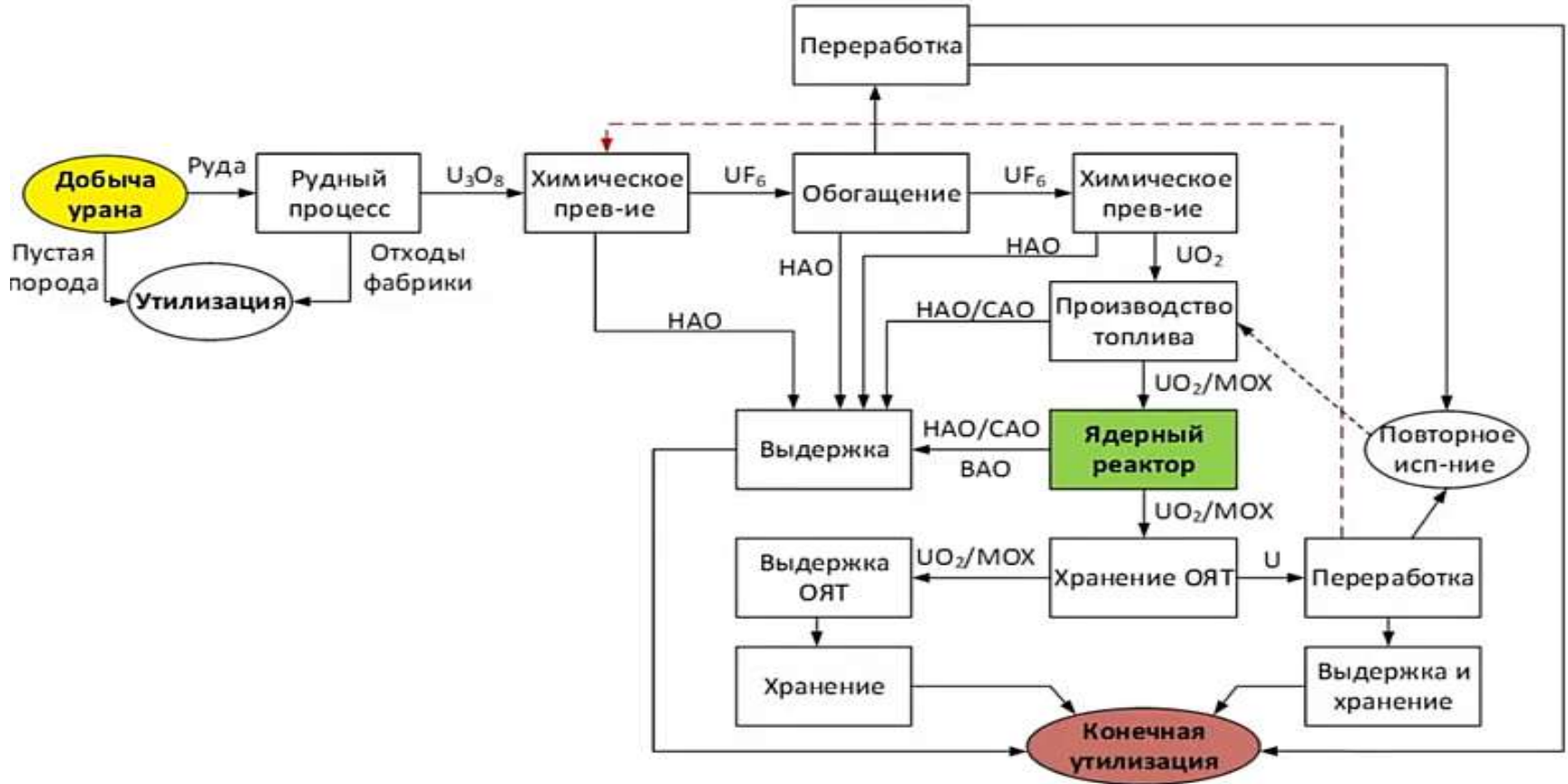
Ежегодная выгрузка ОЯТ (все АЭС России) составляет ~650 тонн.

ОЯТ — топливо, исчерпавшее ресурс и содержащее продукты деления.

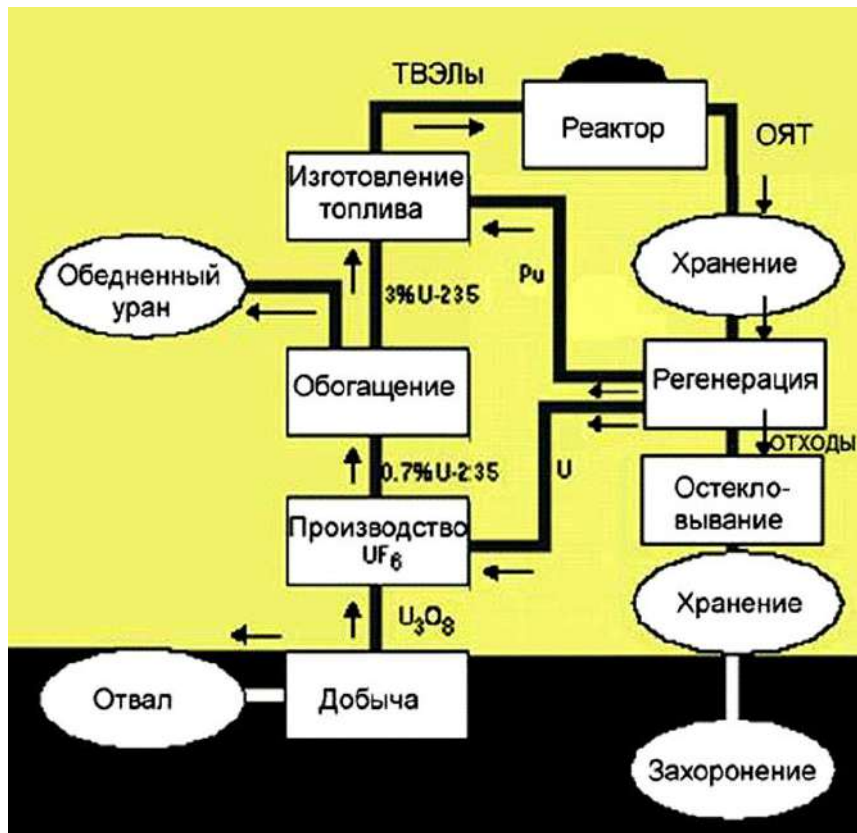
Регулирование: №190-ФЗ, НП-055-14, НП-016-05 и др.

Ядерная безопасность: $k_{эфф} \leq 0.95$ (исключение цепной реакции). █

Открытый и замкнутый ядерный топливный цикл



Технологии обращения с ОЯТ ВВЭР-1000



Цель — сократить потенциальную опасность ОЯТ, уменьшить объем РАО, обеспечить долгосрочную ядерную безопасность и одновременно сохранить ресурсы урана за счет повторного использования делящихся материалов.

Россия, в отличие от некоторых стран, стремится совершить переход от открытого к замкнутому ядерному топливному циклу.

Текущие технологии обращения с ОЯТ ВВЭР-1000



Ключевой центр переработки – радиохимический завод РТ-1 (ПО "Маяк"). В 2016 года была произведена модернизация, что позволило работать с крупногабаритными тепловыделяющими сборками длиной до 4.5 м, характерными для ВВЭР-1000.

Классическая технология переработки:

- Механическое разделениеборок;
- Растворение топливных таблеток в HNO_3 ;
- Экстракционное выделение U, Pu;
- Остекловывание жидких ВАО в боросиликатное стекло.

Следует отметить, что ОЯТ ВВЭР-1000 не всегда перерабатывается,

Перспективные технологии и инновации

Опытно-демонстрационный центр ГХК реализует принципиально новую технологию переработки поколения 3+, исключая образование жидких радиоактивных отходов. ⇒ Испытания на ОЯТ Балаковской АЭС (2018) успешны.

Ключевые особенности:

- Отсутствие жидких РАО;
- Полная автоматизация;
- Модульность оборудования;
- Извлечение >99.9% полезных изотопов.

Интеграция с хранилищами (ГХК):

- Централизованное сухое хранилище (емкость 38 000 т)
- Переработка → МОХ-топливо
- Производство REMIX-топлива для ВВЭР

Эффективное обращение с ОЯТ — ключевой фактор перспектив развития атомной энергетики России.

Конструктивные и эксплуатационные требования к хранилищам ОЯТ



Переработка – лишь часть обращения с ОЯТ. Важную роль играет безопасное, длительное хранение отработавшего топлива.

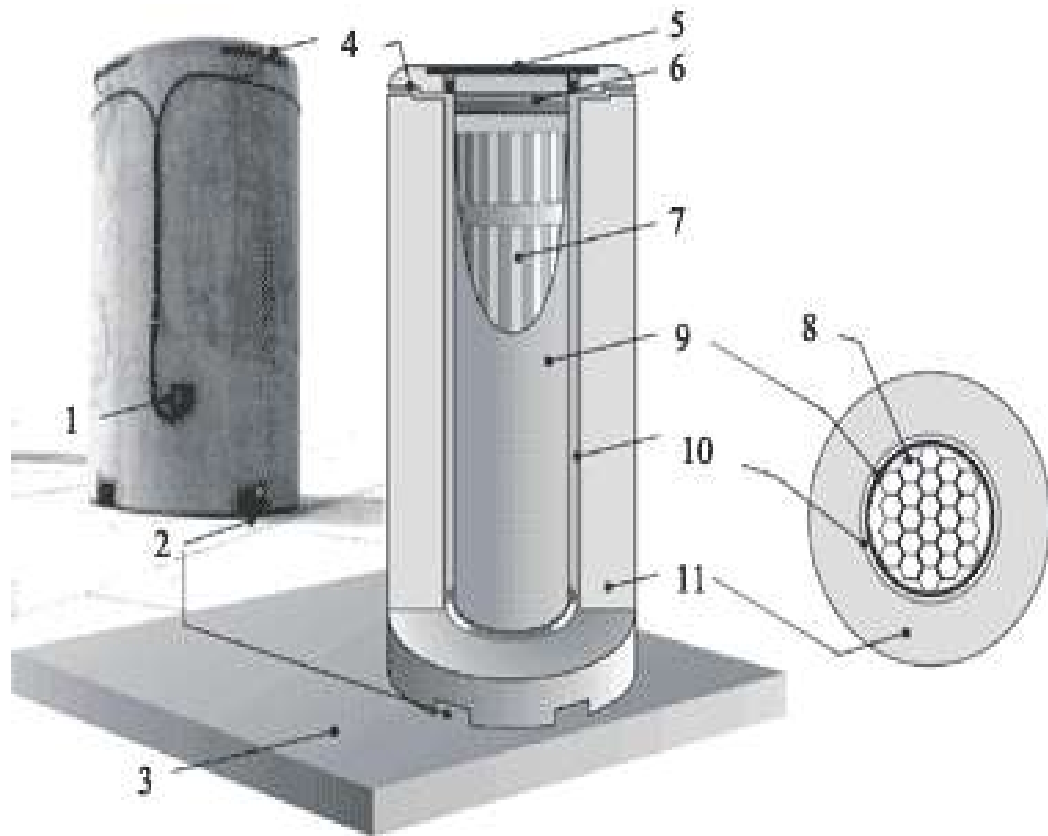
Конструкция хранилищ ОЯТ предусматривает размещение отработавших ТВС в контейнерах с определенной геометрией для безопасного, длительного хранения материалов с высокой радиоактивностью и тепловыделением.

Хранение ОЯТ требует инженерных решений, обеспечивающих безопасность на десятки лет. Используются:

- стеллажи и чехлы с нейтронопоглотителями;
- пассивное охлаждение;
- герметичные контейнеры из бетона и нержавеющей стали.

Пример — централизованное сухое хранилище ОЯТ (ЦСХОЯТ) с проектным сроком хранения до 50 лет.

Схема контейнеров СХОЯТ



1 - датчик температурного контроля; 2 - вход воздуха и направляющие для транспортировки; 3 - бетонная площадка хранения; 4 - выход воздуха; 5 - крышка бетонного контейнера; 6 - силовая и защитная крышки корзины; 7 - блок из 24-х направляющих трубок для ОТВС; 8 - направляющая трубка; 9 - корпус многоместной корзины хранения; 10 - обечайка; 11 - вентилируемый бетонный контейнер

Вызовы и стратегии развития обращения с ОЯТ



Вызовы:

- накопление ОЯТ: несмотря на переработку, объемы растут (~650 т/год);
- ограниченность ресурсов: уран — исчерпаемое сырье;

Технологические ограничения:

- высокая стоимость транспортировки (спецвагоны ТУК-141);
- необходимость длительной "выдержки" топлива (5-7 лет);
- ограничения по приему дефектных сборок;
- образование большого количество РАО в результате переработки.

Стратегия Росатома ("Прорыв"):

- реакторы на быстрых нейтронах (БН, БРЕСТ) для замыкания цикла;
- внедрение REMIX-топлива (рециклинг U+Pu);
- развитие централизованных хранилищ (срок хранения до 50 лет);
- создание мобильных перерабатывающих комплексов.

Цель к 2030 г. – Достичь 85% уровня переработки ОЯТ за счет ввода новых мощностей на ГХК и модернизации завода РТ-1 ("Маяк")

Заключение



- Разработан проект вертикального парогенератора для ВВЭР-1000;
- Выбрана оптимальная скорость теплоносителя (4,21 м/с) по результатам комплексных расчетов;
- Проведен анализ технологий обращения с ОЯТ ВВЭР-1000, включая перспективные технологии и стратегии развития.

Таким образом, безопасное и технологически совершенное обращение с ОЯТ является неотъемлемым элементом долгосрочной стратегии устойчивого развития атомной энергетики и определяет ее перспективы.



Спасибо за внимание!

ВЫВОД АЭС ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ: завершающий этап жизненного цикла

Вывод из эксплуатации (ВЭ) атомной электростанции — это комплексный, многоэтапный инженерный проект, который является логическим и ответственным завершением жизненного цикла ядерного объекта. Это не просто «закрытие» станции, а тщательно спланированный процесс её безопасного демонтажа, дезактивации и возвращения территории для дальнейшего использования. В современной атомной энергетике, где всё больше энергоблоков вырабатывают свой первоначальный ресурс, эта задача становится одной из ключевых для всей отрасли.

Процесс вывода из эксплуатации включает в себя несколько критически важных стадий. После окончательной остановки реактора и выгрузки отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) следует этап дезактивации оборудования и помещений для снижения радиационного фона. Затем наступает основной этап — демонтаж всех сооружений, от вспомогательных систем до корпуса реактора и защитной оболочки (контанаймента). Для выполнения этих работ

применяются передовые технологии, включая робототехнику и методы дистанционного управления, чтобы минимизировать риск для персонала. Завершается процесс рекультивацией территории, которая может варьироваться от полного сноса объектов до перепрофилирования площадки для новых энергетических установок.

Для студентов бакалавриата специальности «Атомные электростанции» тематика вывода из эксплуатации представляет собой обширное поле для научно-исследовательской и проектной деятельности. Это направление требует междисциплинарного подхода, объединяя знания из области материаловедения, теплофизики, строительной механики и экономики.

Работа в этой сфере позволяет применить на практике фундаментальные знания и стать участником создания новой индустрии по обращению с объектами ядерного наследия, что гарантирует высокий спрос на таких специалистов на десятилетия вперёд.



«Вывод из эксплуатации энергоблоков АЭС»

Студент группы ТФ-12-21

Сосков Егор Александрович

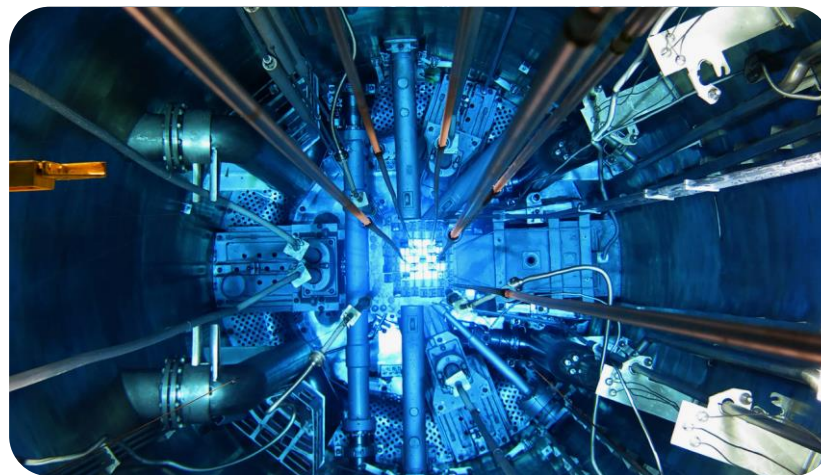
Научный руководитель Солдатов Игорь Михайлович



Вывод из эксплуатации (ВиЭ) блока АЭС — это деятельность, осуществляемая после удаления ядерного топлива и других ядерных материалов. Это деятельность, направленная на достижение заданного конечного состояния блока АЭС, исключая использование блока АЭС в качестве источника энергии и обеспечивающая безопасность персонала, населения и окружающей среды.

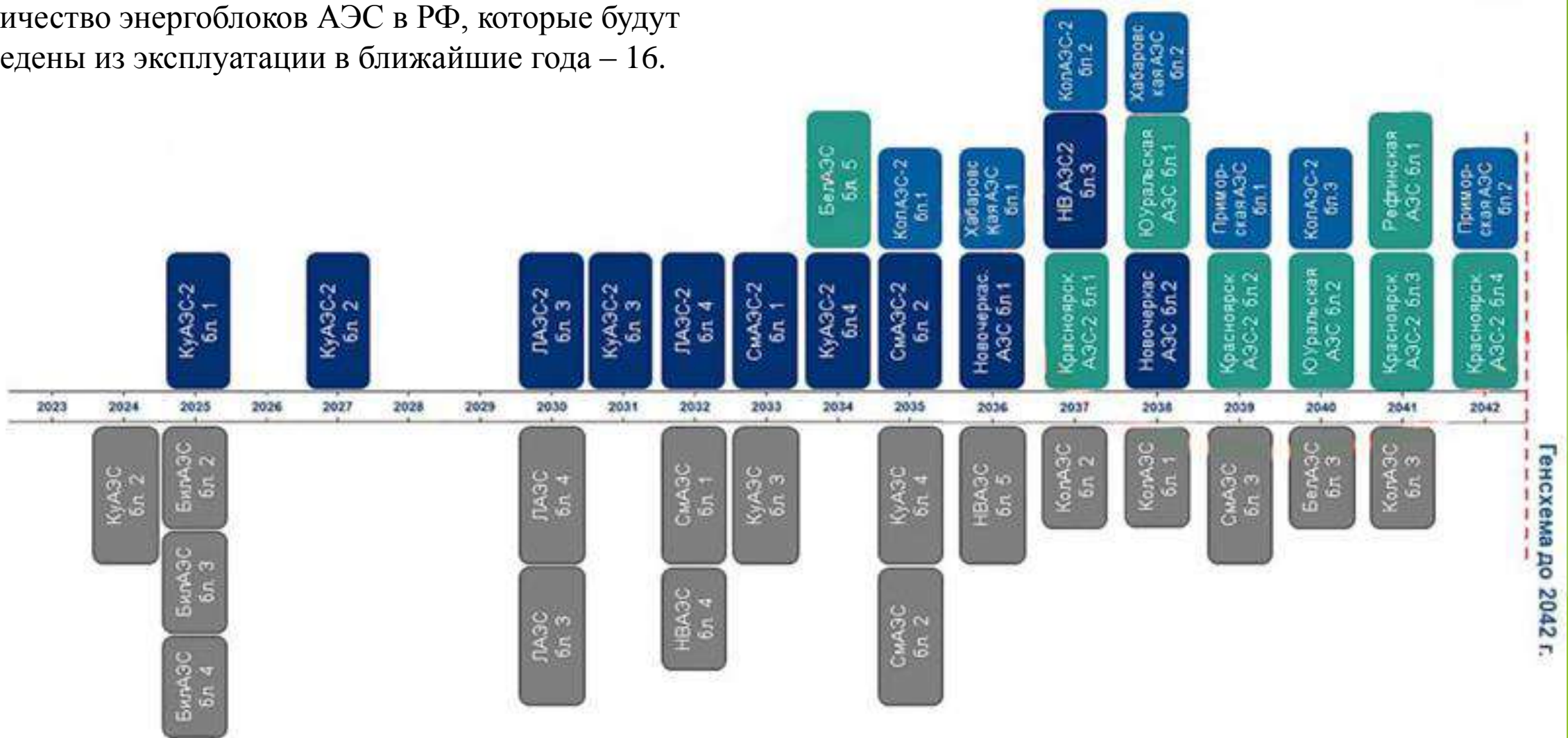
Цель работы

- ❖ Анализ существующих отечественных практик вывода из эксплуатации энергоблоков АЭС.
- ❖ Выбор наиболее перспективного метода фрагментации, моделирования, дезактивации оборудования.
- ❖ Расчёт средств защиты для персонала во время работ по фрагментации оборудования АЭС в зонах повышенного уровня радиации.



Дорожная карта АЭС в РФ

Количество энергоблоков АЭС в РФ, которые будут выведены из эксплуатации в ближайшие годы – 16.



Генсхема до 2042 г.

* Проект ДК в соответствии с проектом генеральной схемы размещения объектов электроэнергетики до 2042 года, размещенной на общественное обсуждение



К выполнению данной задачи привлекается большое количество российских организаций.

Место ВиЭ в жизненном цикле АЭС

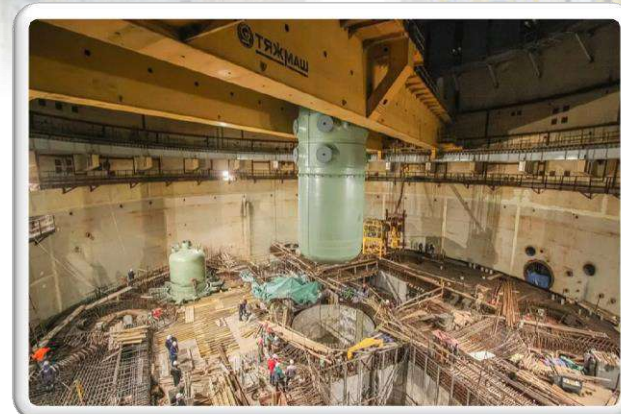
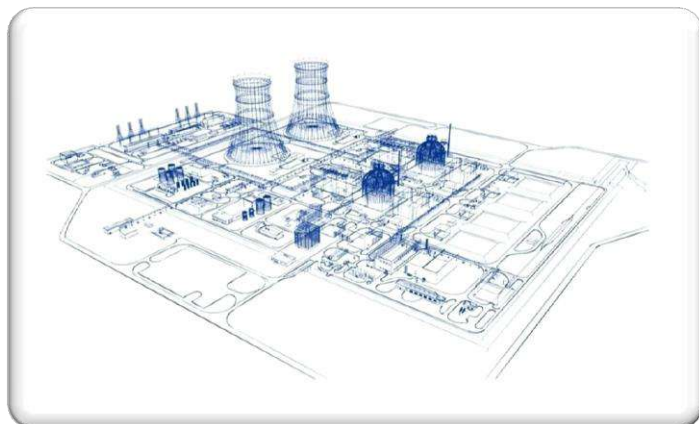
Проектирование

Строительство

Эксплуатация

Эксплуатация в
рамках ПСС

Вывод из
эксплуатации



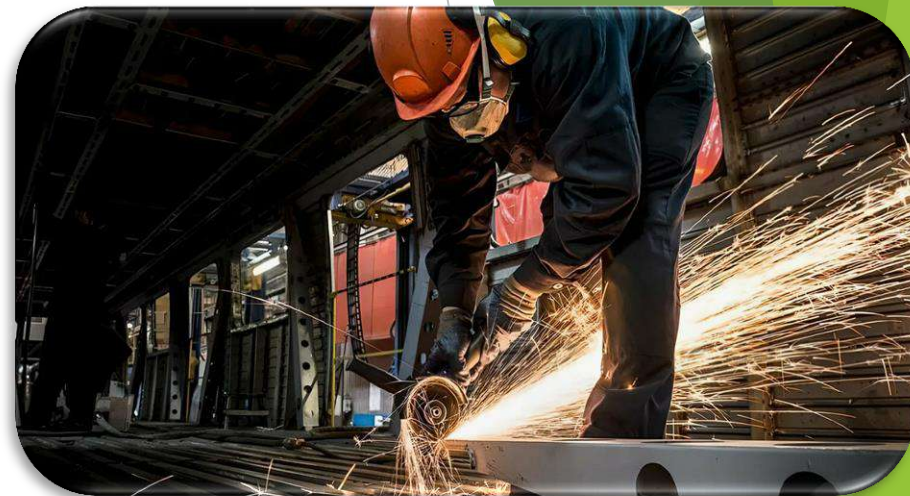
Сценарии ВиЭ



Аспект/признак сравнения	Сценарий ВиЭ	
	Захоронение (Медленный)	Ликвидация (Немедленный)
Общие положения	Подготовка	
	Консервация	
	1. Сохранение под наблюдением	1. Демонтаж систем и оборудования 2. Демонтаж зданий, сооружений 3. Рекультивация площадки
Примеры объектов, выведенных из эксплуатации	Промышленные уран-графитовые реакторы (ПУГР), ЭИ-2 на СХК	РБМК на ЛАЭС, ВВЭР-440 на НВАЭС
Метод дезактивации	Естественная дезактивация оборудования, строительных конструкций, зданий и сооружений	Искусственное ускорение процесса дезактивации
Состояние объекта	Объект остаётся на месте в ожидании естественной дезактивации	Объект не остаётся на месте, демонтаж металлоконструкций начинается раньше
Статус использования территории ВиЭ АЭС	Не используется повторно до полной дезактивации	Может быть использована повторно для любых других целей после рекультивации
Ответственность	Переносится на будущие поколения	Несет текущий состав высококвалифицированного персонала

Этапы ВиЭ АЭС

Этап	Стратегия ликвидации	Стратегия захоронения
Демонтаж	Полный демонтаж всех элементов АЭС и разборка оборудования.	Демонтаж элементов энергоблоков, не подлежащих повторному использованию.
Обращение с РАО	Сбор, обработка, хранение и утилизация всех образовавшихся радиоактивных отходов.	Создание защитных барьеров вокруг локализованных помещений для предотвращения распространения радиации, а также защиты от стихийных бедствий и несанкционированного доступа.
Рекультивация	Очистка территории, восстановление экосистемы, приведение площадки в состояние, пригодное для дальнейшего использования.	Территория остаётся в долгосрочной консервации; используются барьеры для минимизации возможного вреда окружающей среде. Рекультивация выполняется в ограниченных масштабах.

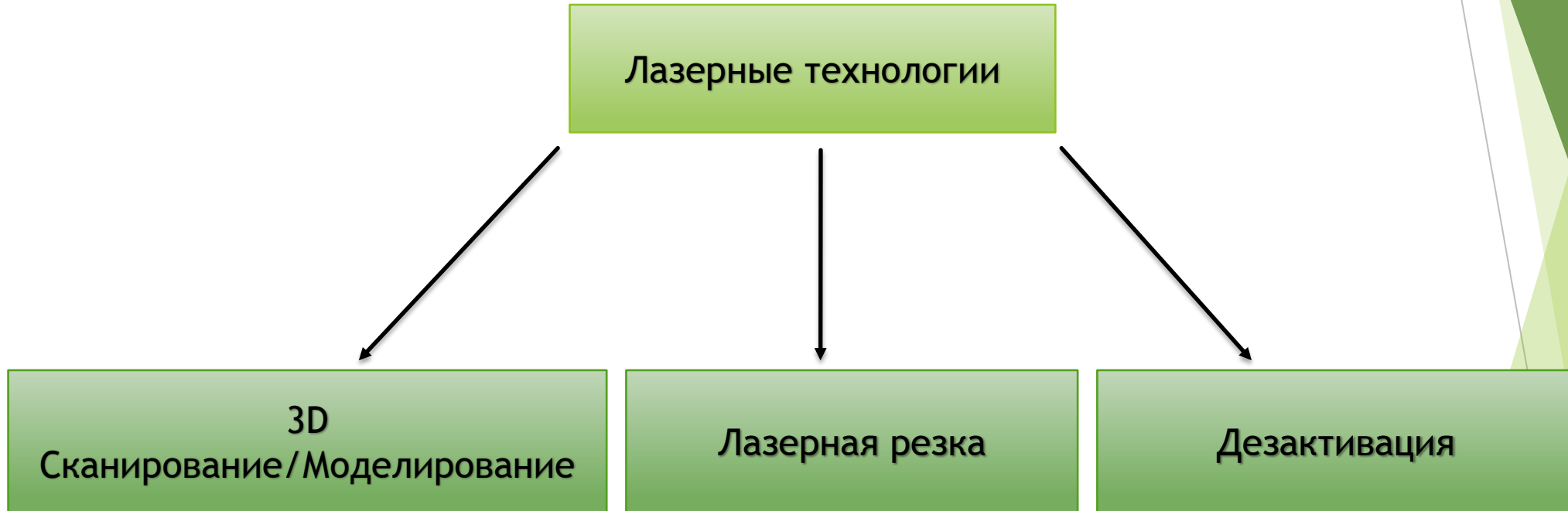


1. International Atomic Energy Agency (IAEA) // 2024 URL: <https://pris.iaea.org/PRIS/CountryStatistics/CountryDetails.aspx?current> (дата обращения: 01.12.2024)
2. Дорожная карта до 2045 года в части АЭС большой и средней мощности // Атомная энергетика. 2024 URL: <https://www.atomic-energy.ru/video/149844> (дата обращения: 02.12.2024)
3. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций «НП-001-15»: Утв. Фс по эк.тех., и ат.надз. 17.12.2015, уч. №522–2016. – 46 с.
4. Перспективная Программа работ по ВиЭ стендовых установок по отработке технологий обращения с РАО ВМФ в зл. 500 ФГУП «НИТИ»: Утв. УВЭ ЯРОО 10.06.2014, уч. № 05-14-225П. – 2014. – 21 с.
5. Технологические и организационные аспекты обращения с радиоактивными отходами // Серия учебных курсов МАГАТЭ. – Вена, МАГАТЭ, 2005.
6. Schlett J. Laser paint removal takes off in aerospace // Vision Spectra. 2016. URL: https://www.photonics.com/Articles/Laser_Paint_Removal_Takes_Off_in_Aerospace/a61353 (дата обращения: 06.12.2024).
7. Schweizer G., Werner L. Industrial 2 kW TEA CO2 laser for paint stripping of aircraft // Proceedings of SPIE. 1994. Vol. 2502. P. 57–62.
8. Liu K., Garmire E. Paint removal using lasers // Applied Optics. 1995. Vol. 34. P. 4409–4415.
9. Prinstoo F.J., Heerlen S.P.V., Komander E., Doma L.S. Efficient TEA CO2 laser based coating removal system // Proceedings of SPIE. 2007. Vol. 6346. P. 1–8.
10. Tsunemi A., Hagiwara K., Saito N., Nagasaka K., Miyamoto Y., Suto O. Complete removal of paint from metal surface by ablation with a TEA CO2 laser // Applied Physics A. 1996. Vol. 63. P. 435–439.
11. Chen C.X., Kwee T.J., Tan K.P., Choo Y.S., Hong M.H. Laser cleaning of steel for paint removal // Applied Physics A. 2010. Vol. 101. P. 249–253.
12. Forbes A., Du Preez N.C., Belyi V., Botha L.R. Paint stripping with high power flattened Gaussian beams // Proceedings of SPIE. 2009. Vol. 7430. P. 1–5.
13. Pantelakis S.G., Keramidis T.B., Haidemenopoulos G.N. Mechanical behavior of 2024 Al alloy specimen subjected to paint stripping by laser radiation and plasma etching // Theoretical and Applied Fracture Mechanics. 1996. Vol. 25. P. 139–146.
14. Лосев В.Ф., Ципилев В.П. Лазерные технологии и оборудование: учеб. пособие. Томск: Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2008. 148 с.
15. Delaporte Ph., Gastaud M., Marine W. et al. Dry excimer laser cleaning applied to nuclear decontamination // Applied Surface Science. 2003. Vol. 208–209. P. 298–305.
16. Виноходов А.Ю. Электроразрядные лазерные и плазменные источники излучения УФ и ВУФ диапазона с высокой частотой следования импульсов: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Троицк: РФЯЦ «ВНИИЭФ», 2004. 301 с.
17. Galantucci L.M., Gravina A., Chita G., Cinquepalmi M. An experimental study of paint-stripping using excimer laser // Polymer and Polymer Composites. 1997. Vol. 5. No. 2. P. 87–94.
18. Учёные Курчатовского института и РХТУ нашли способ с помощью фемтосекундных световых импульсов соединять кристаллы для твердотельных лазеров // Атомная энергия 2.0 URL: <https://www.atomic-energy.ru/news/2021/12/22/120498> (дата обращения: 06.12.2024).
19. В России впервые демонтировали высотные металлоконструкции при помощи мобильной лазерной установки Росатома // ТРИНИТИ РОСАТОМ URL: <https://www.atomic-energy.ru/news/2021/12/22/120498> (дата обращения: 06.12.2024).
20. Джайские технологии для борьбы с ядерными отходами // СТРАНА РОСАТОМ URL: <https://strana-rosatom.ru/2019/12/04/dzhedajskie-tehnologii-dlya-borby-s-yad/> (дата обращения: 06.12.2024).
21. В Росатоме разработана новая технология дезактивации оборудования АЭС // ТРИНИТИ РОСАТОМ URL: <https://www.trinit.ru/info/news/v-rosatome-razrabotana-novaya-tehnologiya-dezaktivatsii-oborudovaniya-aes/> (дата обращения: 06.12.2024).
22. Главная страница // СоюзАтом России URL: <http://strosatom.ru/media/news> (дата обращения: 06.12.2024).
23. Патент // Surveying instrument URL: <https://patents.google.com/patent/USD843860S1/en> (дата обращения: 07.12.2024).
24. Патент // Optical system for collecting distance information within a field URL: [https://patents.google.com/patent/US10063849B2/en?q=\(Velodyne+HDL-32E\)&oq=Velodyne+HDL-32E](https://patents.google.com/patent/US10063849B2/en?q=(Velodyne+HDL-32E)&oq=Velodyne+HDL-32E) (дата обращения: 06.12.2024).
25. Патент // Method and device for detecting the form of sails URL: <https://patents.google.com/patent/US20170219712A1/en> (дата обращения: 07.12.2024).
26. KEYENCE // 2D/3D Laser Profiler NEW LJ-X8000 Series Resolution Inline Measurement 3200 points/profile URL: https://camerondevine.me/courses/me300/notes_b1/11-laser_Profilometer_Catalog.pdf (дата обращения: 06.12.2024).
27. Патент // Differential sinusoidal phase modulation laser interferometric nanometer displacement measuring apparatus and method URL: [https://patents.google.com/patent/US1125565B2/en?q=\(Renishaw+XL-80\)&oq=Renishaw+XL-80](https://patents.google.com/patent/US1125565B2/en?q=(Renishaw+XL-80)&oq=Renishaw+XL-80) (дата обращения: 06.12.2024).
28. Патент // Method and apparatus for alignment of a precision cal assembly URL: [https://patents.google.com/patent/US6977730B2/en?q=\(Verifire\)&assignee=&oq=Zygo+Verifire](https://patents.google.com/patent/US6977730B2/en?q=(Verifire)&assignee=&oq=Zygo+Verifire) (дата обращения: 06.12.2024).
29. Патент // Sensor for measuring flow speed of a fluid URL: [https://patents.google.com/patent/US9557344B2/en?q=\(Dantec+Dynamics+FiberFlow\)&oq=Dantec+Dynamics+FiberFlow](https://patents.google.com/patent/US9557344B2/en?q=(Dantec+Dynamics+FiberFlow)&oq=Dantec+Dynamics+FiberFlow) (дата обращения: 12.2024).
30. Патент // Methods and apparatus for reducing noise via a sma fairing URL: [https://patents.google.com/patent/US20080067283A1/en?q=\(TSI+Incorporated+Laser+Doppler+Velocimeter\)&oq=TSI+Incorporated+Laser+Doppler+locimeter](https://patents.google.com/patent/US20080067283A1/en?q=(TSI+Incorporated+Laser+Doppler+Velocimeter)&oq=TSI+Incorporated+Laser+Doppler+locimeter) (дата обращения: 06.12.2024).
31. Анализ радиационной безопасности // Журнал «РЭА» № 06, АО «Российский концерн по производству электрической и тепловой энергии на атомных станциях» // Москва, 2011 60-61с.
32. Кузнецов В.М. Вывод из эксплуатации объектов атомной энергетик: дис...док.тех.наук. Москва 2003. 58-64 с.
33. Разработка автоматизированных систем радиационного контроля (АСРК) // ТРИНИТИ РОСАТОМ URL: https://niti.ru/?page_id=1970 (дата обращения: 21.12.2024)

Для анализа существующих российских и зарубежных практик ВиЭ АЭС, были изучены как отечественные, так и зарубежные источники литературы.

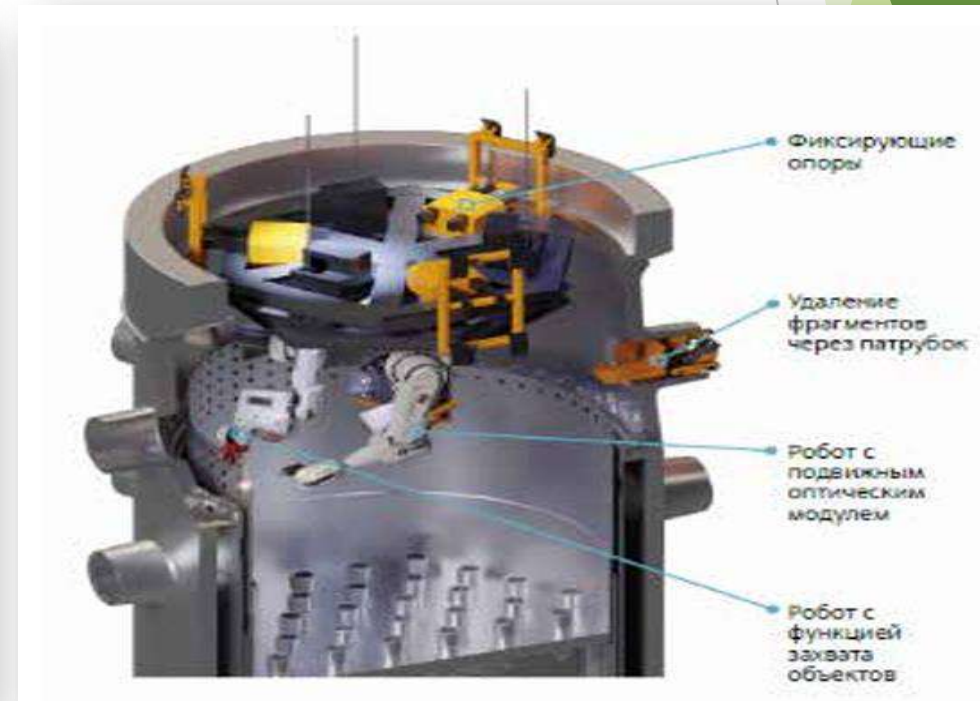
Направления развития

- ▶ В настоящее время существуют три основных направления развития лазерных технологий при ВиЭ АЭС



Лазерная резка

- ▶ В России одной из ведущих организаций, внедряющих лазерные технологии в демонтаж, является Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований (АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ»)
- ▶ Последним на данный момент мобильным лазерным комплексом, созданным в АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», стал МЛТК-20, используемый для дистанционной фрагментации металлоконструкций АЭС.



Лазерная резка

- ▶ Сравнительный анализ существующих на рынке методов резки показал, что лазерная резка имеет ряд неоспоримых преимуществ перед другими видами, таких как:

- 1) Высокая скорость и точность резки;
- 2) Отсутствие расходных материалов и, соответственно, необходимости их замены (в отличие от взрывоопасной кислородной или плазменной резки (сопла, электроды) либо механической резки (пилы));
- 3) Отсутствие необходимости подачи газа в рабочую зону. Лазерное излучение способно обеспечивать разделительную резку и без подачи газа (хотя возможность подачи газа в конструкции выходной оптической головки предусмотрена), для обеспечения газолазерной резки достаточно использования атмосферного воздуха. В случае необходимости в использовании режущего газа при лазерной резке, его давление будет не более 2–10 бар;
- 4) Высокое качество излучения оптоволоконных лазеров, а также построение специализированной выходной оптической системы, обеспечивают высокую фокусировку лазерного излучения на объекте воздействия. Это позволяет создать минимальную область реза;



Лазерная резка

- 5) Бесконтактная резка материала. В связи с отсутствием необходимости в режущем газе, высокой фокусирующей способностью и качеством лазерного излучения лазерный метод способен обеспечивать дистанционную резку с расстояний 0,05 до 5 м от зоны воздействия;
- 6) Лазерное излучение на определенной длине волны способно без потерь передаваться на большие расстояния по транспортному оптоволокну. В отличие от других методов при лазерной резке операторы находятся за пределами радиационно зараженной области;
- 7) В отличие от абразивной резки, после лазерной резки не остается каких-либо дополнительных загрязнений;
- 8) Для фрагментации корпуса реактора ВВЭР достаточно источника лазерного излучения мощностью 30–50 кВт с КПД не менее 35 %. Такие источники существуют и доступны на рынке;
- 9) Возможность проведения подводной и воздушной резки.



Лазерная резка



Таким образом, лазерная резка является наиболее перспективным методом фрагментации оборудования в ходе ВЭ ЯРОО. Планируется, что знания и опыт, полученные при выполнении фрагментации корпусов и ВКУ реакторов типа ВВЭР, будут применены при выводе из эксплуатации реакторов типа РБМК, имеющих принципиально иную конструкцию.



3D Сканирование

- ▶ 3D-сканирование — это процесс сбора данных о поверхности объекта в цифровом формате для определения его формы.
- ▶ Лазерные технологии играют ключевую роль в получении данных для 3D моделирования и сканирования.
- ▶ Ведущей компанией в области 3D моделирования в России является ГК «Неолант».
- ▶ Получение данных для дальнейшего 3D моделирования осуществляется специальными приборами, основное их отличие заключается в формате работы сенсора: одномерном, двухмерном, трёхмерном, некоторые из них:



LIDAR, лазерное сканирование



Лазерная триангуляция, контроль качества измерения



Лазерная интерферометрия, Измерение мелких деформаций



Лазерная доплеровская анемометрия (LDA), абсолютный метод измерения

3D Сканирование

► Основные примеры 3D моделирования на основе, полученных данных за счёт 3D сканирования:

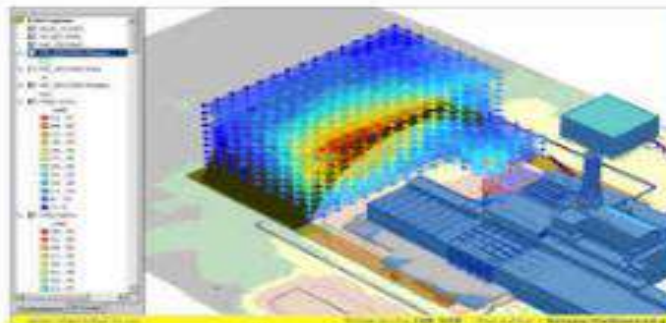
- 1) Моделирование реакторного зала (а) ;
- 2) Моделирование систем безопасности (б) ;
- 3) Моделирование процессов (в);
- 4) Моделирование инфраструктуры (г);



а)



б)



в)



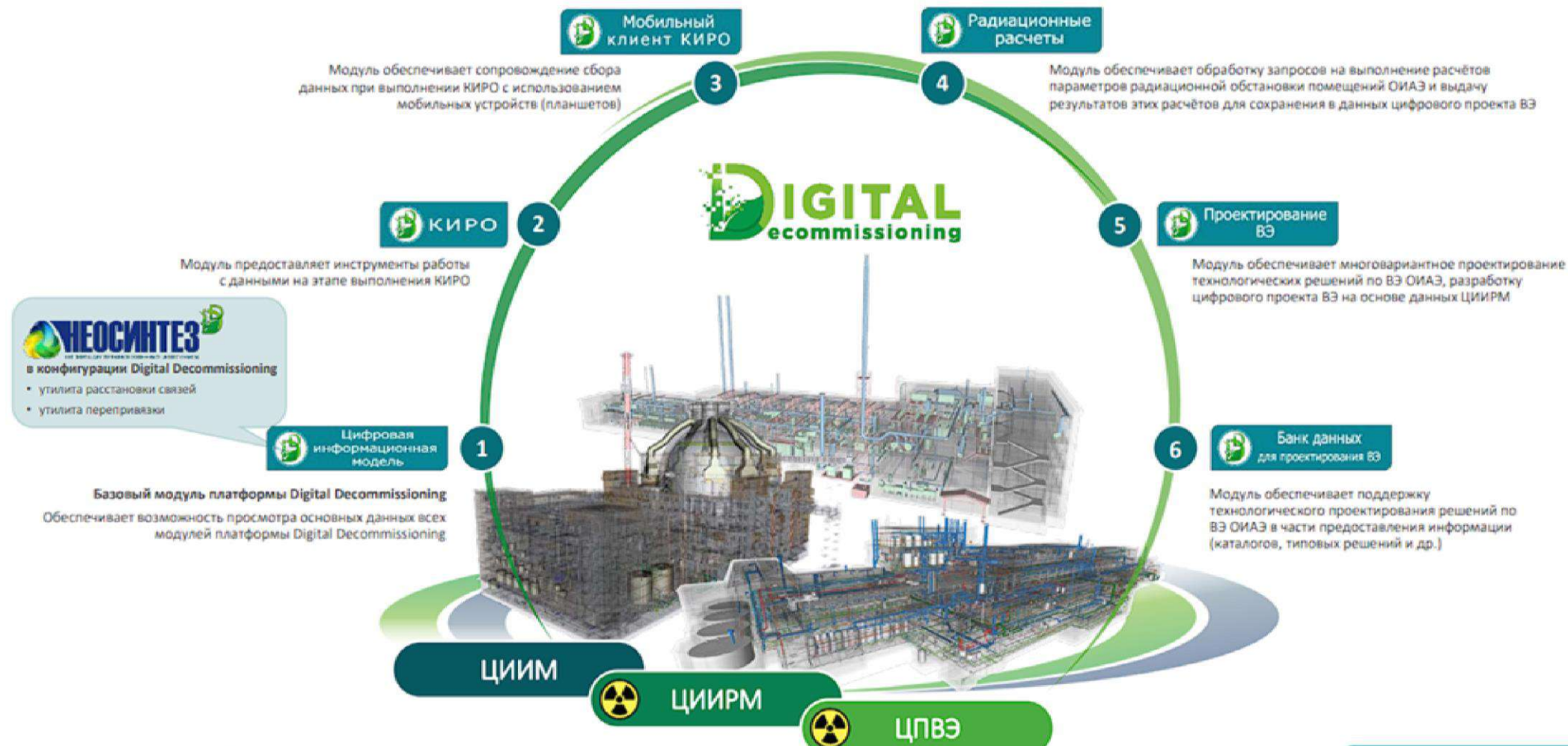
г)

3D Сканирование

Структура цифровой платформы

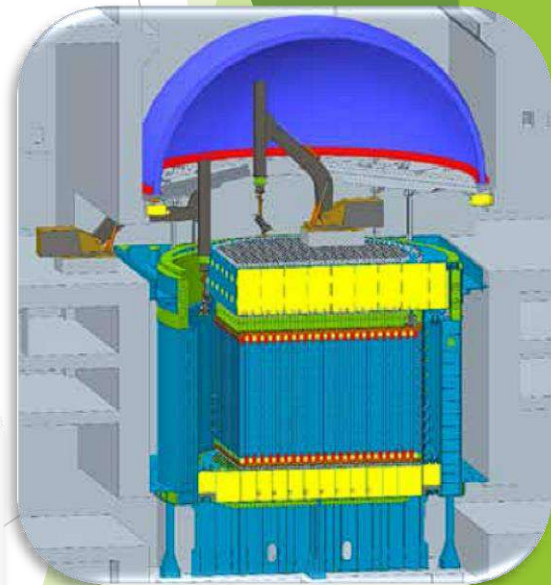
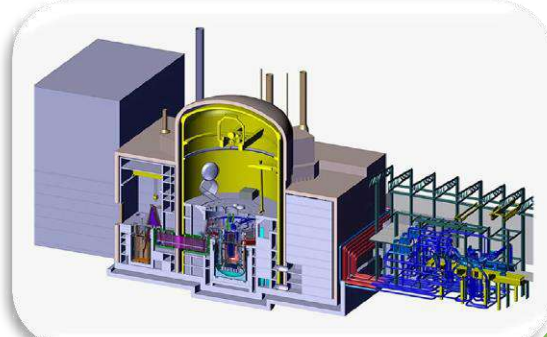
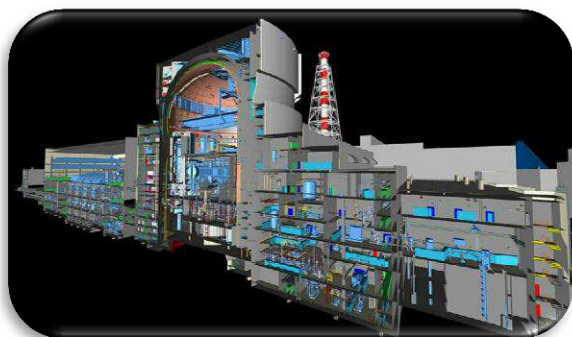
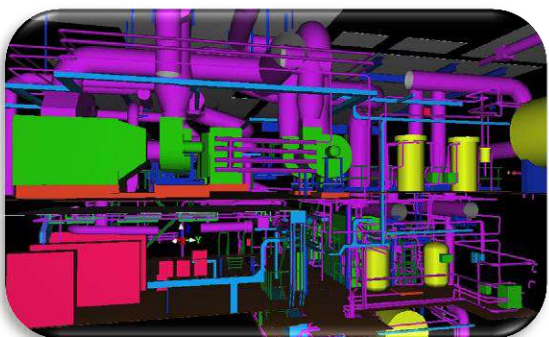


Состав модулей цифровой платформы Digital Decommissioning



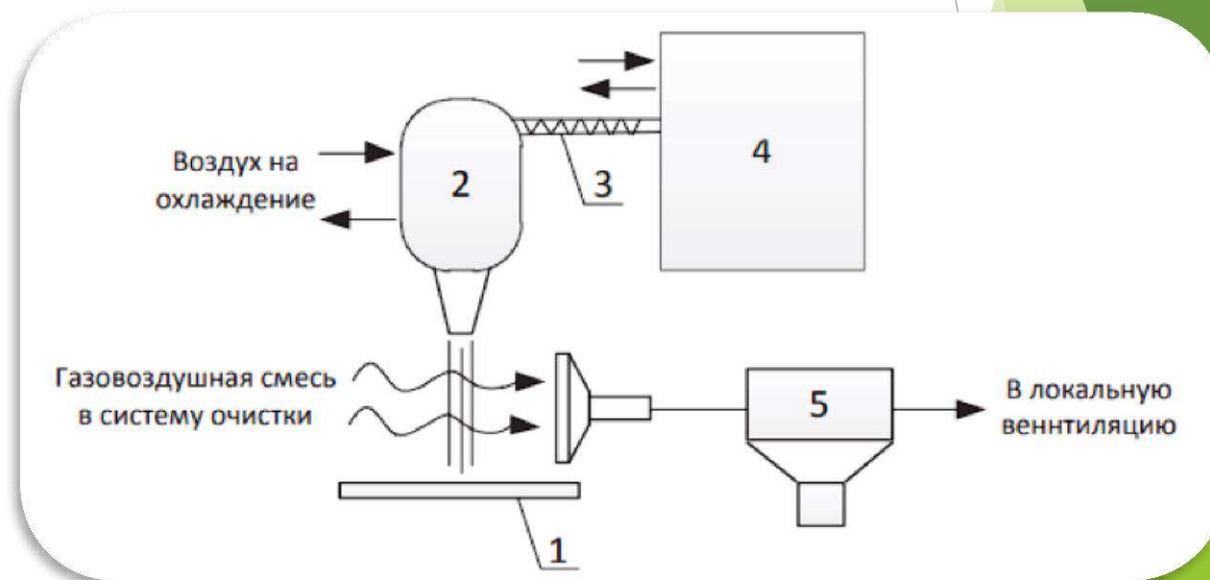
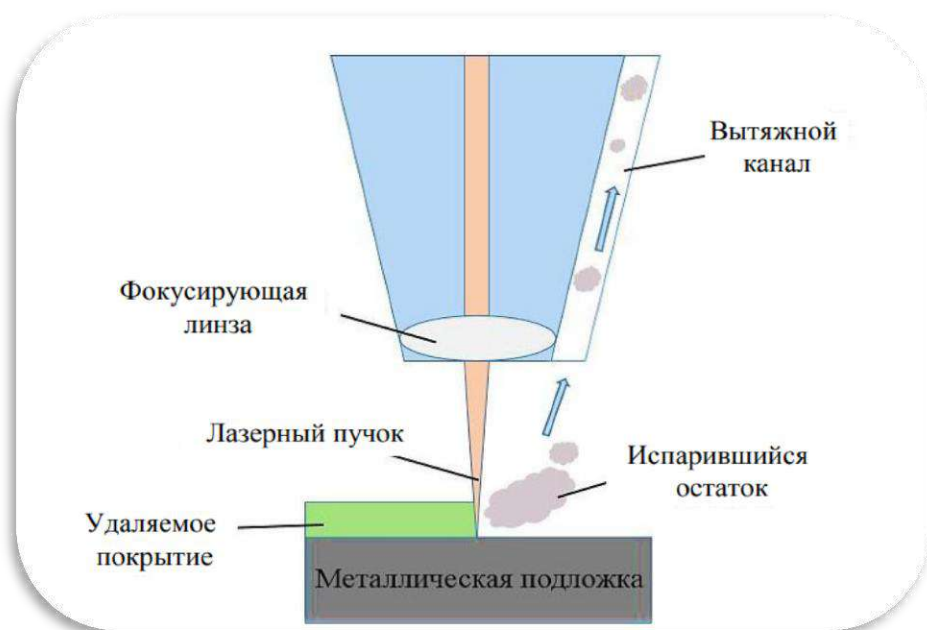
3D Сканирование

- ▶ В практику планирования, организации и выполнения работ по ВиЭ блоков АЭС все масштабнее внедряются и успешно применяются информационные технологии, позволяющие представлять 3D-модели объектов проведения работ и применительно к этим объектам осуществлять имитационное, в том числе интерактивное моделирование выполняемых на них технологических операций.
- ▶ Это в значительной мере улучшает представление персонала об особенностях объектов и условиях проведения на них работ и позволяет ему наработать практические навыки выполнения этих работ, что в реальных условиях способствует снижению дозовых нагрузок персонала.
- ▶ А так же упрощает работы по фрагментации, реконструкции, планированию новых объектов ядерного использования.



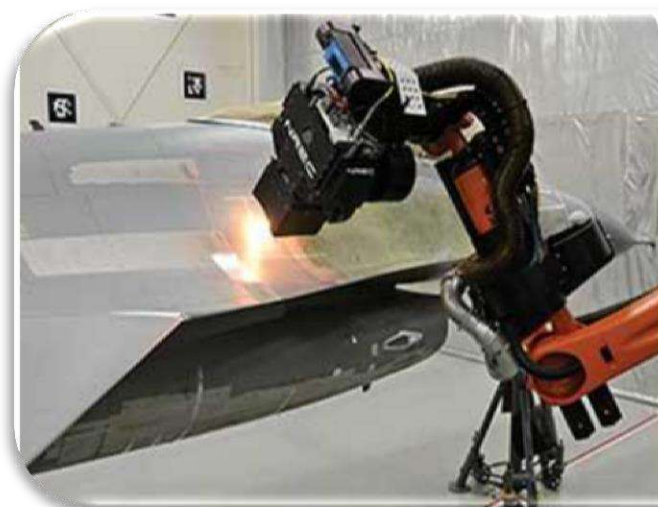
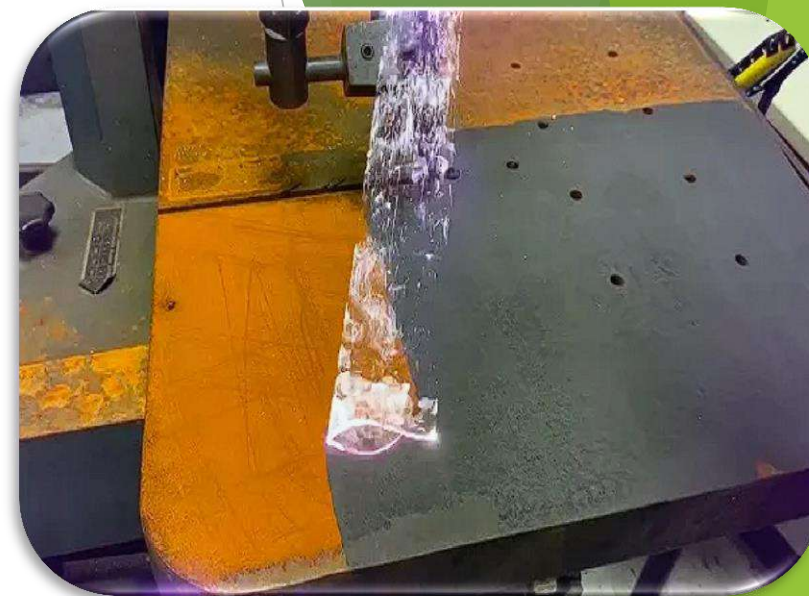
Лазерная дезактивация

- Процесс лазерной очистки состоит в удалении поверхностных загрязнений или покрытий путем их перевода в газообразную или пылевую фракцию за счет воздействия лазерного излучения.



Лазерная дезактивация

- ▶ Дезактивация поверхностей оборудования способствует значительному уменьшению вероятности поступления радиоактивных веществ в организм человека через органы дыхания, желудочно-кишечный тракт и кожные покровы, а также снижает дозовые нагрузки персонала, занятого в условиях воздействия источников ионизирующего излучения.
- ▶ Одним из главных преимуществ является возвращение металла, образующегося при выполнении демонтажных работ, в промышленный оборот



Классификация лазеров

Тип лазера	Активная среда	Примеры применения
Твёрдотельные	Кристаллы или стёкла с примесями ионов переходных или редкоземельных элементов (рубиновый, неодимовый лазер)	Используются для высокоточного резания или сверления радиоактивных материалов и демонтажа компонентов реакторов.
Оптоволоконные	Оптическое волокно, легированное редкоземельными элементами	Применяются для дистанционной резки и сварки в труднодоступных местах внутри атомных станций.
Полупроводниковые	Полупроводниковые материалы (арсенид галлия)	Используются для точной маркировки компонентов или диагностики повреждений с помощью лазерной визуализации.
Газовые	Газы или пары металлов (гелий-неоновый, углекислый лазер)	Применяются для очистки поверхностей от радиоактивного налёта, резки и сварки.
Химические	Продукты химических реакций, приводящие к инверсной заселённости	Используются для мощной резки толстых металлических конструкций в процессе демонтажа ядерных объектов.
На центрах окраски	Кристаллы с дефектами, создающими энергетические уровни, участвующие в лазерной генерации	Применяются в исследовательских задачах для анализа материалов и структуры радиоактивных компонентов.
На красителях	Растворы органических красителей	Используются для визуализации или определения трещин и дефектов в материалах оборудования АЭС.
Экимерные	Экимеры (возбуждённые димеры) галогенидов инертных газов	Применяются для прецизионной очистки поверхности, включая стеклянные или металлические элементы.
На свободных электронах	Пучок свободных электронов, ускоряемых в магнитном поле	Используются для генерации мощного излучения, применяемого в радиационной обработке отходов или анализе свойств материалов.
Рентгеновские	Плазма высокоионизированных атомов, генерирующая излучение в рентгеновском диапазоне	Используются для неразрушающего контроля внутренних структур оборудования или мониторинга состояния

Расчётная часть

Целью расчётной части является: предложение снижения дозовых нагрузок на персонал во время выполнения демонтажных работ.

Наиболее опасным для персонала является гамма-излучение.

- Цезий-137 (Cs-137), испускающий гамма-кванты с энергией 0,662 МэВ;
- Кобальт-60 (Co-60), излучающий два основных гамма-кванта с энергиями 1,173 МэВ и 1,332 МэВ;
- Йод-131 (I-131), испускающий гамма-кванты с энергиями 0,364 МэВ и 0,637 МэВ;
- Радий-226 (Ra-226), излучающий гамма-кванты с наиболее интенсивными линиями при энергиях 0,186 МэВ и 0,352 МэВ.

Данные изотопы являются долгоживущими, что более пагубно сказывается на персонале и окружающей среде.

Расчётная часть. Коэффициенты ослабления.

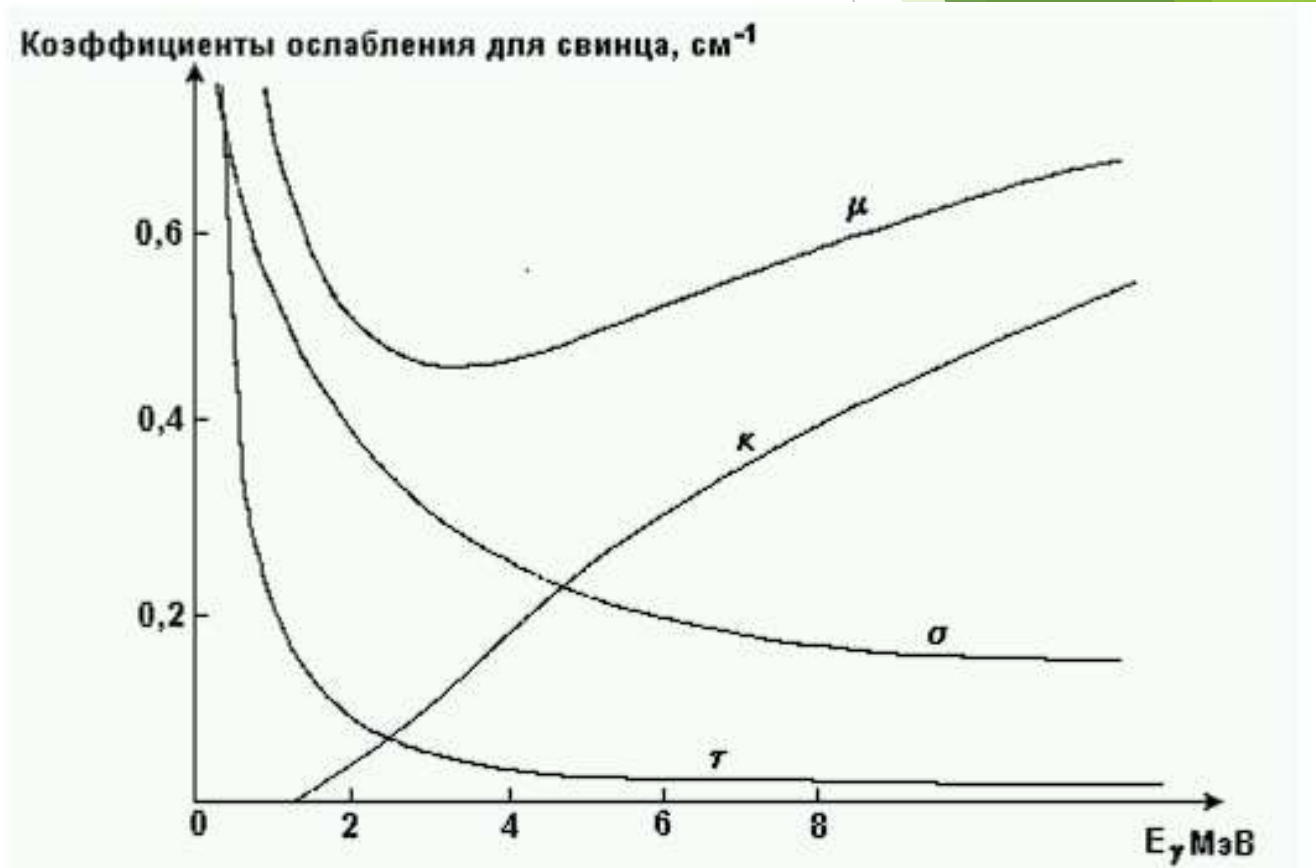
При прохождении гамма-квантов через вещество происходит их рассеяние и поглощение, приводящее к ослаблению пучка по экспоненциальному закону, подобному закону Ламберта для оптического диапазона:

$$N_{\gamma}(d) = N_{\gamma}(0) \exp(-\mu d)$$

N_{γ} - число гамма-квантов, μ - коэффициент ослабления, зависящий от энергии квантов и характеристик поглощающего вещества, d - толщина слоя вещества.

На самом деле μ - состоит из трёх слагаемых $\mu = \tau + \sigma + \kappa$, где τ, σ, κ - коэффициенты ослабления, обусловленные соответственно фотоэффектом, комптоновским рассеянием и образованием электронно-позитронных пар.

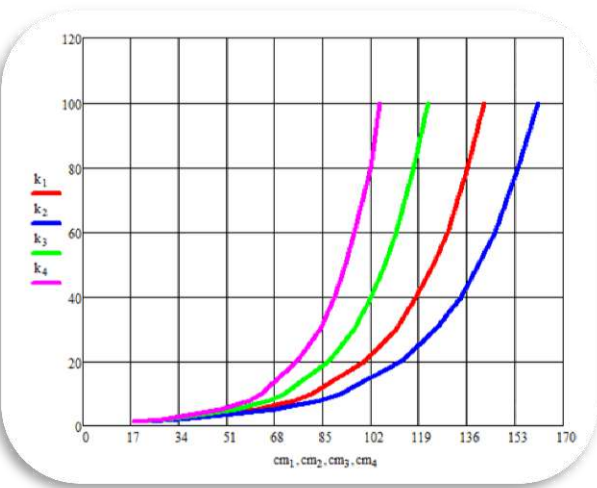
$$\tau = f_1(E_{\gamma}) \frac{Z\rho}{A} \quad \sigma = f_2(E_{\gamma}) \frac{Z\rho}{A} \quad \kappa = f_3(E_{\gamma}) \frac{Z^2\rho}{A}$$



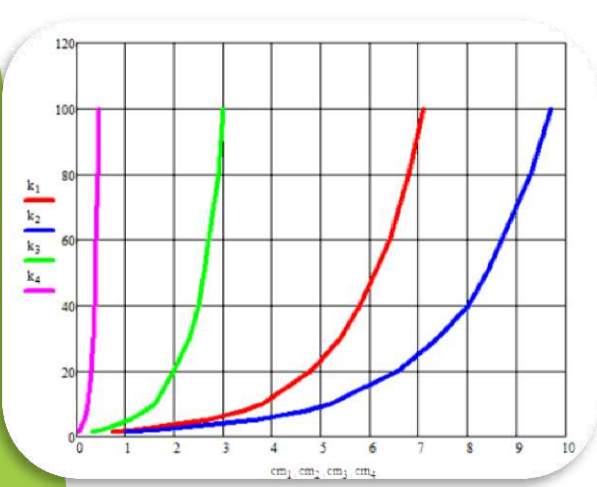
Расчётная часть. Блок-схема программы.

► Для расчёта кратности ослабления была предложена следующая программа:

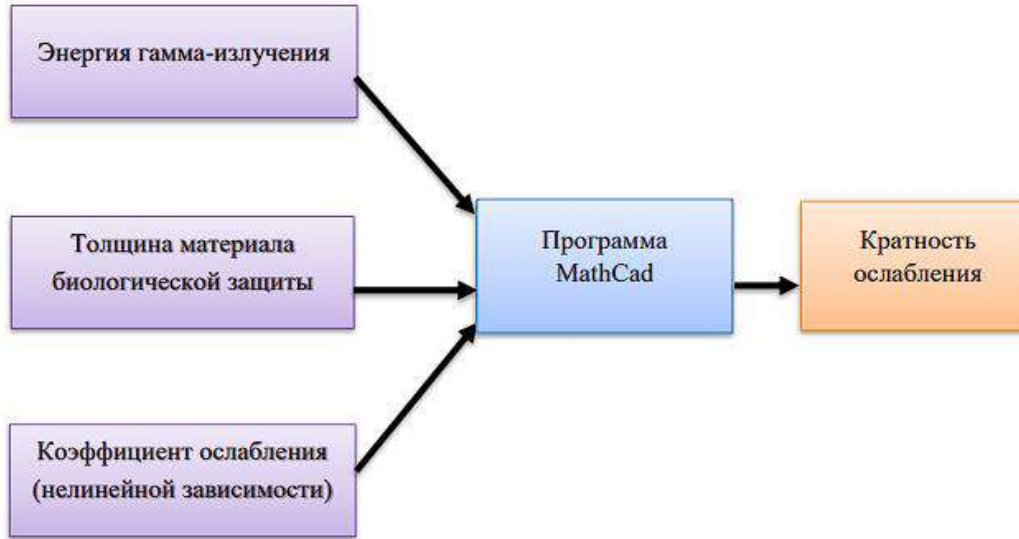
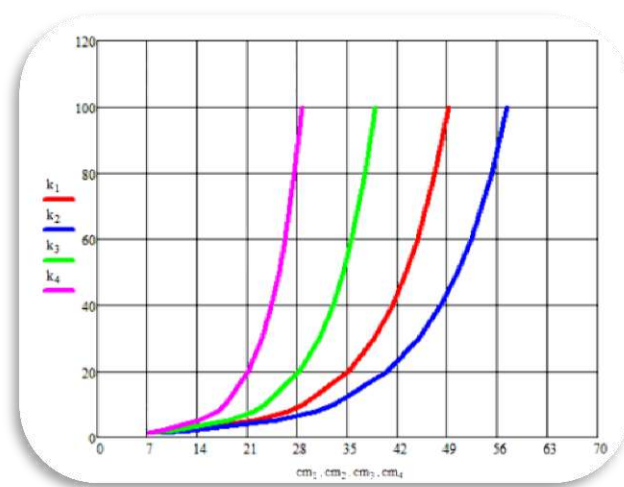
Вода



Свинец



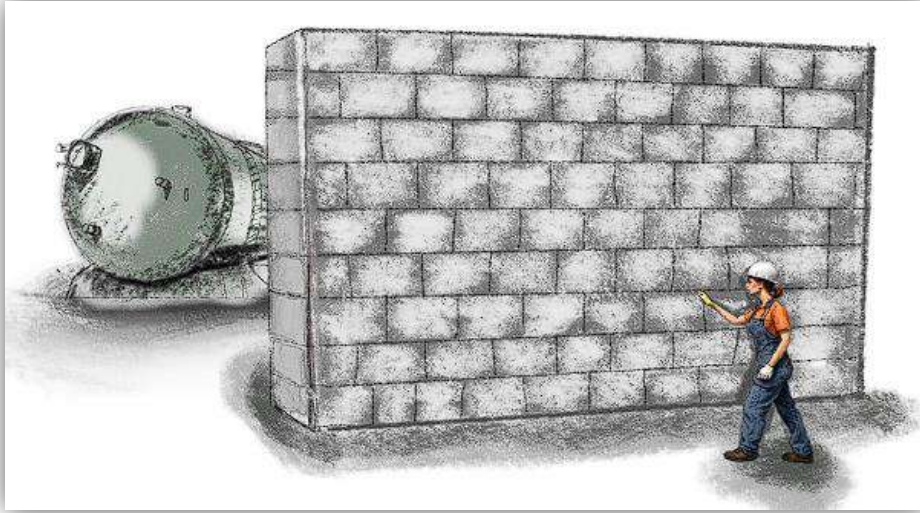
Бетон



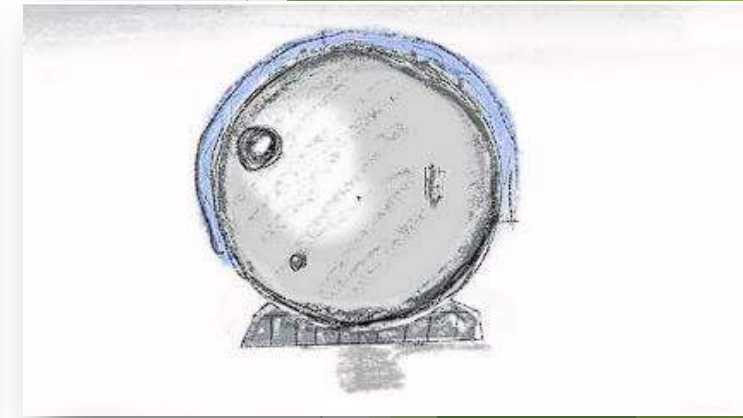
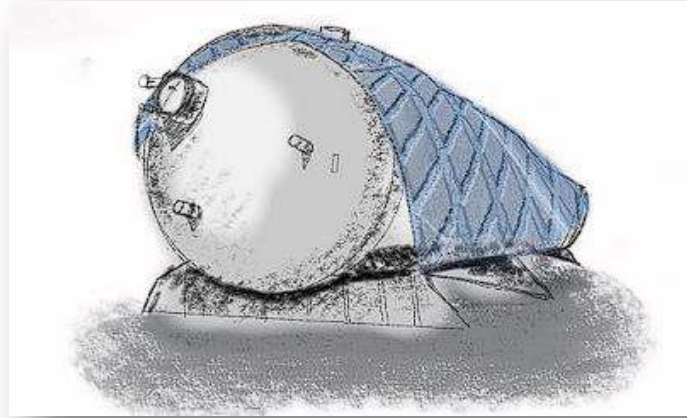
Материалы	Энергия, МэВ						Кратность ослабления
	0.2	0.5	1	1.5	2	3	
Свинец	0.05	0.32	0.74	1	-	-	1.5
	0.08	0.52	1.2	1.7			2
	0.17	1.1	2.7	3.7			5
	0.21	1.4	3.4	4.7			8
	0.24	1.6	3.8	5.2			10
	0.3	2	4.8	6.6			20
	0.34	2.3	5.4	7.4			30
	0.37	2.5	5.8	8			40
	0.39	2.6	6.1	8.4			50
	0.4	2.7	6.4	8.7			60
	0.43	2.9	6.8	9.3			80
	0.45	3	7.1	9.7			100
Бетон	7.2	7.6	8	8.7	-	-	1.5
	9	10.5	11.9	13			2
	14.3	18.5	22.1	25.2			5
	16.8	22	26.8	30.6			8
	17.9	23.6	28.9	33.2			10
	21.1	28.4	35.3	40.7			20
	23.1	31.1	38.8	45			30
	24.4	33	41.4	48.1			40
	25.5	34.5	43.3	50.4			50
	26.3	35.6	44.8	52.3			60
	27.6	37.5	47.3	55.2			80
	28.6	38.9	49.2	57.4			100
Вода	-	-	18	19	21	22	1.5
			28	29	32	34	2
			49	54	62	68	5
			59	66	75	84	8
			63	71	81	91	10
			76	87	100	113	20
			84	96	111	125	30
			89	102	118	134	40
			93	107	124	140	50
			96	111	129	146	60
			102	117	136	154	80
			105	122	142	161	100

Расчётная часть. Модели защитных сооружений.

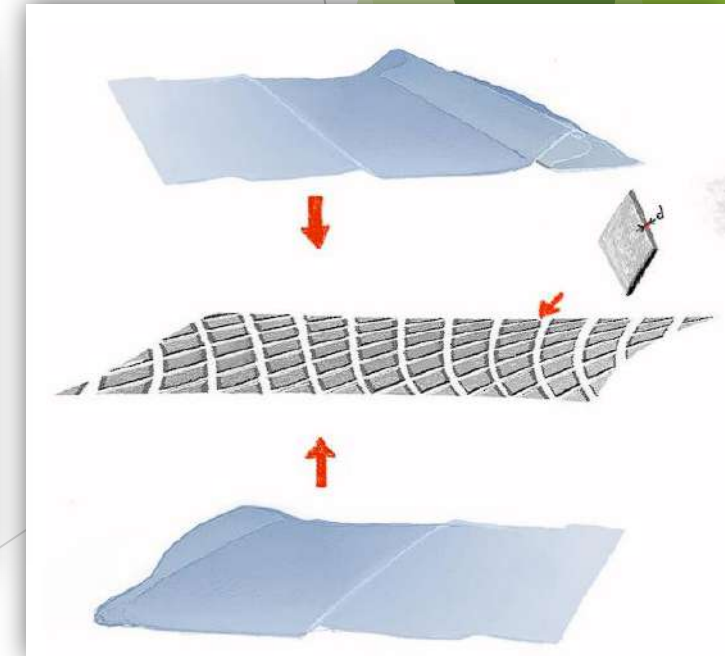
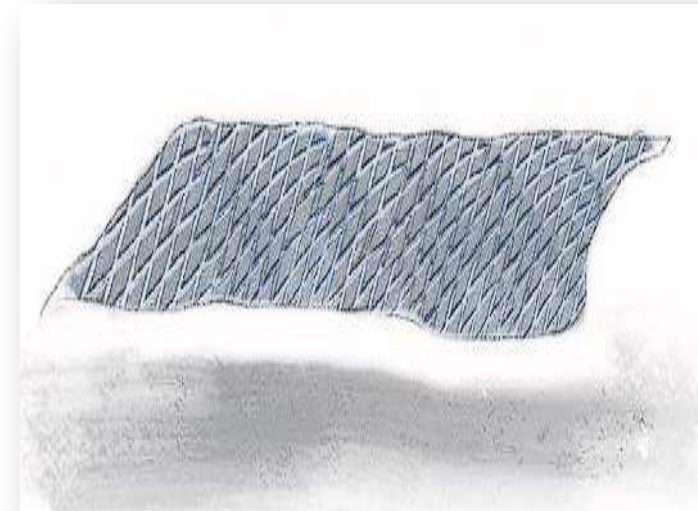
Бетонная стена:



Свинцовые «одеяла»:



Защитные элементы в форме ромбов, закрепленных на плотном термопластичном полиуретане с минимальными зазорами между ними. Для повышения надежности вся конструкция покроется дополнительным слоем плотного термопластичного полиуретана.



Заключение

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы были рассмотрены ключевые аспекты вывода из эксплуатации энергоблоков АЭС, включая:

- ▶ **Анализ отечественных практик** - изучен опыт российских проектов по ВиЭ энергоблоков АЭС, выявлены преимущества и ограничения существующих подходов.
- ▶ **Выбор перспективных методов** - определены оптимальные технологии фрагментации, моделирования и дезактивации оборудования, обеспечивающие безопасность и экономическую эффективность.
- ▶ **Расчёт средств защиты персонала** - предложены методы снижения дозовых нагрузок на персонал при работах в зонах с повышенным уровнем радиации. Разработаны защитные конструкции.

Спасибо за внимание!

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ МОНИТОРИНГА ОБОРУДОВАНИЯ АЭС: взгляд сквозь преграды

Обеспечение целостности и надёжности оборудования атомных станций на протяжении всего срока службы — ключевая задача безопасности. Традиционные методы диагностики, такие как ультразвуковой и рентгеновский контроль, требуют близкого доступа к исследуемой поверхности, что не всегда возможно из-за мощных слоев биологической защиты. Современные перспективные технологии позволяют проводить мониторинг, не нарушая целостность конструкций и обеспечивая «взгляд» сквозь метровые слои бетона и стали.

Одной из самых инновационных и эффективных методик является мюонная радиография (мюонография). Этот метод основан на регистрации потока космических мю-мезонов (мюонов) — элементарных частиц, которые постоянно пронизывают Землю. Проходя через плотные объекты, такие как корпус реактора или защитные бетонные стены, мюоны рассеиваются и поглощаются. Анализируя траекторию и интенсивность прошедшего потока частиц с помощью специальных детекторов, можно построить высокоточную трёхмерную карту плотности материала и обнаружить внутри него

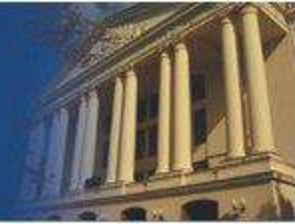
аномалии: скрытые полости, трещины или скопления разрушенных топливных элементов (кориум), не вскрывая сам объект.

Мюонография стала всемирно известной после её успешного применения для изучения внутренних структур пирамид в Гизе, а известность и признание среди атомщиков получила после исследования аварийных реакторов на АЭС Фукусима (Япония), где она оказалась единственной технологией, позволившей получить данные о состоянии аварийных реакторов.

Наряду с мюонографией, будущее мониторинга лежит в области цифровых двойников, систем непрерывного контроля, предиктивной аналитики.

Активно развивается использование технологий ИИ (искусственного интеллекта) для задач мониторинга, в частности, для распознавания дефектов сварных швов, прогноза ресурса оборудования, он-лайн распознавание аномалий в работе оборудования.

Квалификация бакалавра вполне позволяет выполнять интересные и практически важные исследования в данном направлении.



Прямоточный ПГ с перегревом пара для энергоблока ВВЭР-ТОИ в двухпетлевой компоновке

СТУДЕНТ: **КУЗНЕЦОВА П. А.**

ГРУППА: **ТФ-11-18**

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ: **КАВЕРЗНЕВ М.М.**

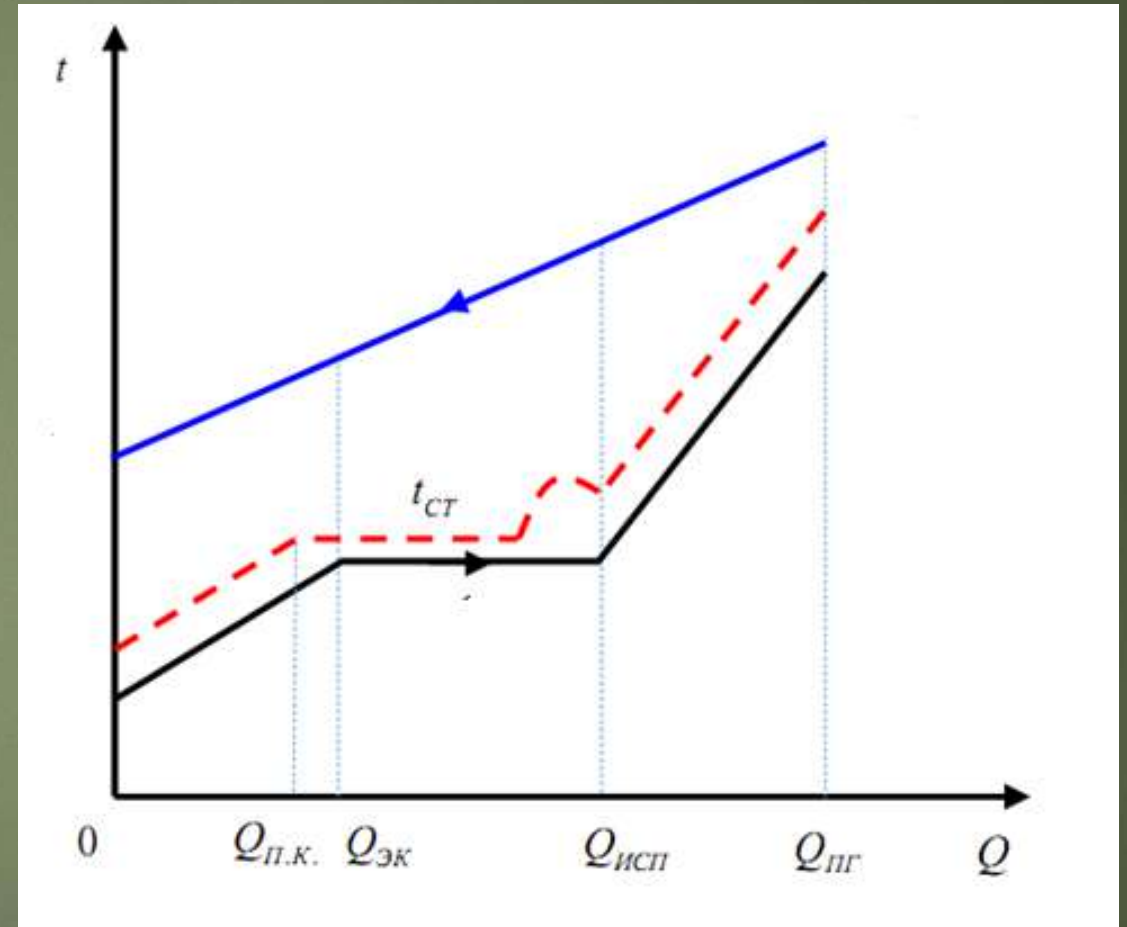
Москва, 2022

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ РАСЧЕТА

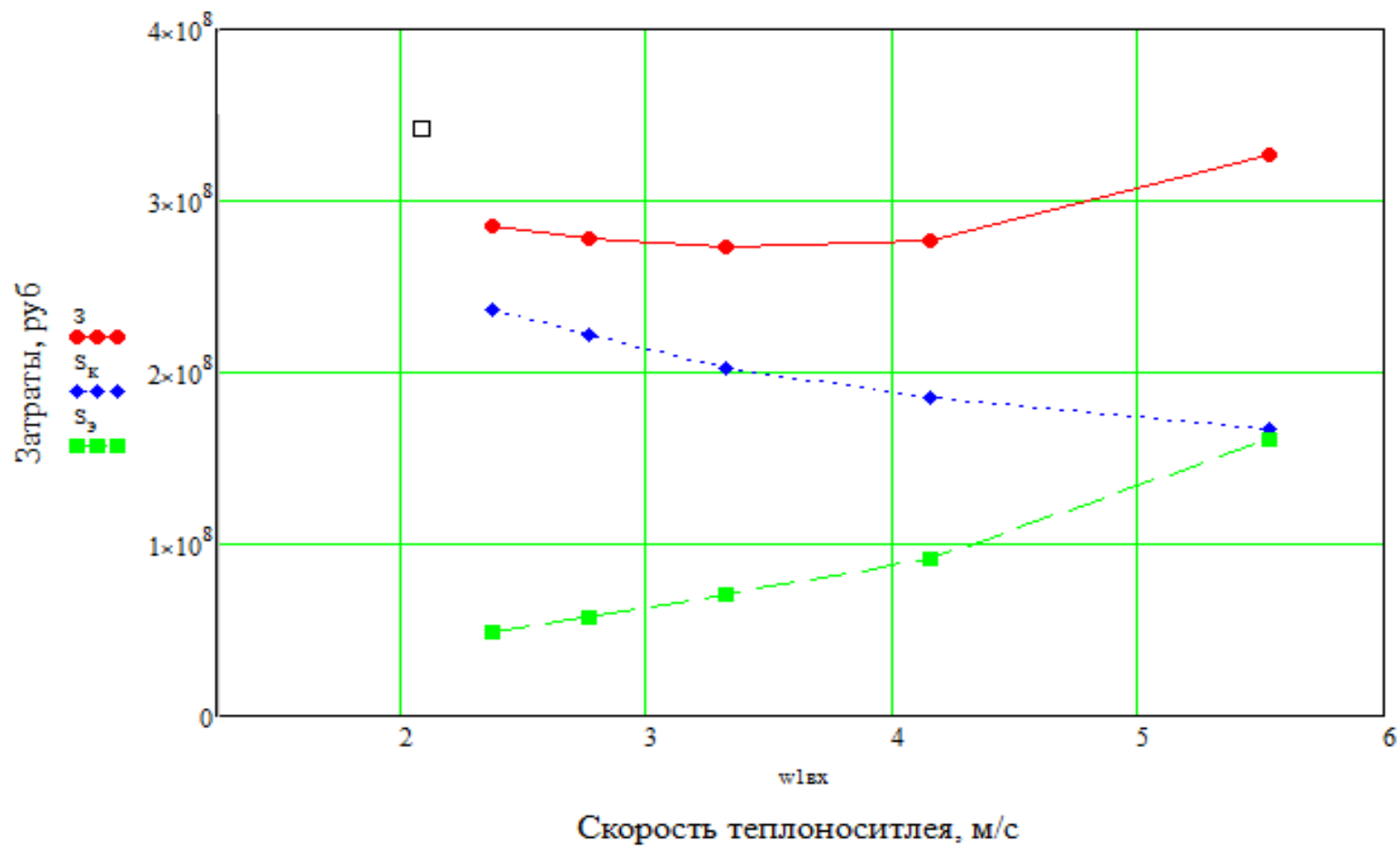
Наименование	Обозначение	Размерность	Значение
Тепловая мощность парогенератора	$Q_{пг}$	МВт	1620
Давление теплоносителя	P_1	МПа	16.2
Давление рабочего тела	P_2	МПа	6.5
Температура теплоносителя на выходе	$t_{1\text{вых}}$	$^{\circ}\text{C}$	330
Температура теплоносителя на входе	$t_{1\text{вх}}$	$^{\circ}\text{C}$	298
Температура питательной воды	$t_{пв}$	$^{\circ}\text{C}$	230
Температура пара на выходе из ПГ	$t_{пп}$	$^{\circ}\text{C}$	300.68

МАТЕРИАЛ ТРУБ ТЕПЛОПЕРЕДАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ, ТРУБНЫХ ДОСОК, ЭЛЕМЕНТОВ КОРПУСА

Деталь	Марка стали
Трубы теплопередающей поверхности	08X14МФ
Трубные доски, корпус, плакируемый со стороны, омываемой рабочим телом, патрубки подвода питательной воды и теплоносителя, люк-лазы	10ГН2МФА
Плакировка	08X14МФ



При расчете учтены зона поверхностного кипения в экономайзере и зона ухудшенного теплообмена в испарителе



Выбор оптимальной скорости



Приведем основные результаты расчёта ПГ:

- ▶ 1) Тепловая мощность: $Q_{пг} = 1620 \text{ МВт}$
- ▶ 2) Паропроизводительность: $D = 861.908 \text{ кг/с}$
- ▶ 3) Площадь теплообменной поверхности: $S = 13660 \text{ м}^2$
- ▶ 4) Скорость теплоносителя: $w = 3.32 \text{ м/с}$
- ▶ 5) Длина корпуса: $L = 12.113 \text{ м}$
- ▶ 6) Наружный диаметр: $D_{к.внеш} = 3.529 \text{ м}$
- ▶ 7) Масса: $M_{пг} = 216.719 \text{ т}$
- ▶ 8) Стоимость парогенератора: $Ц_{пг} = 935.1 \text{ млн.руб}$

Общий вид

Поперечный разрез





Применение мюонной томографии для диагностики оборудования АЭС

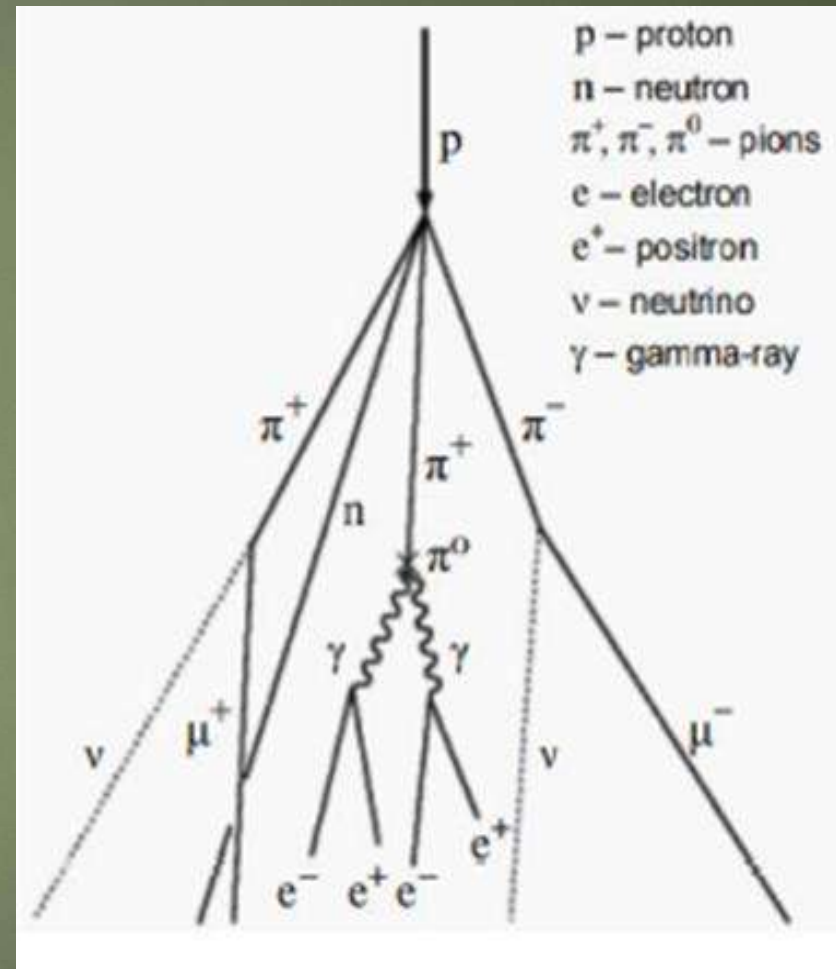
Физические свойства мюонов

- Мюон - неустойчивая элементарная частица, образующаяся при распаде пионов (π -мезонов) и каонов (K-мезонов) в слоях атмосферы:

$$\pi^+ (K^+) \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu,$$

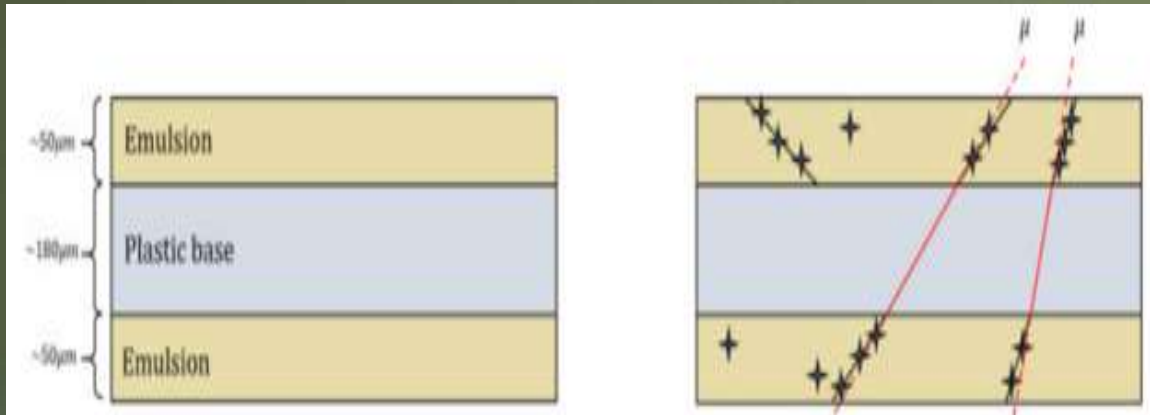
$$\pi^- (K^-) \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu.$$

- Электрический заряд: -1
- Spin: $1/2$ (относится к семейству фермионов)
- Масса мюона: 1.883×10^{-28} кг или 105,658374 МэВ
- Время жизни мюона: 2.21969811 микросекунды

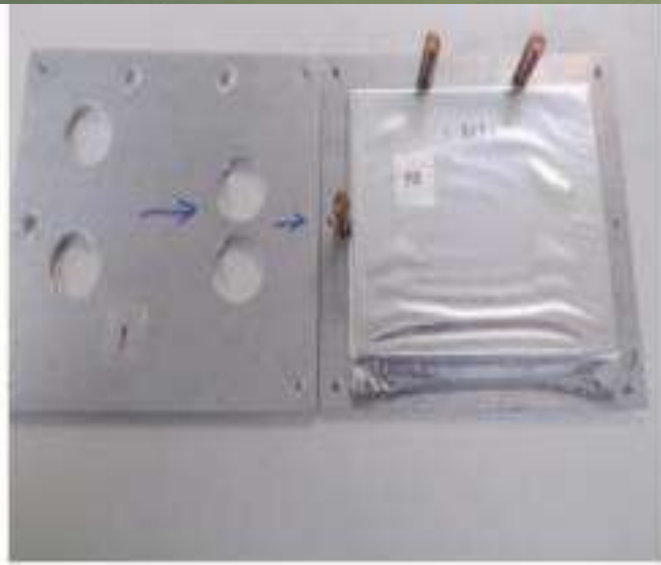
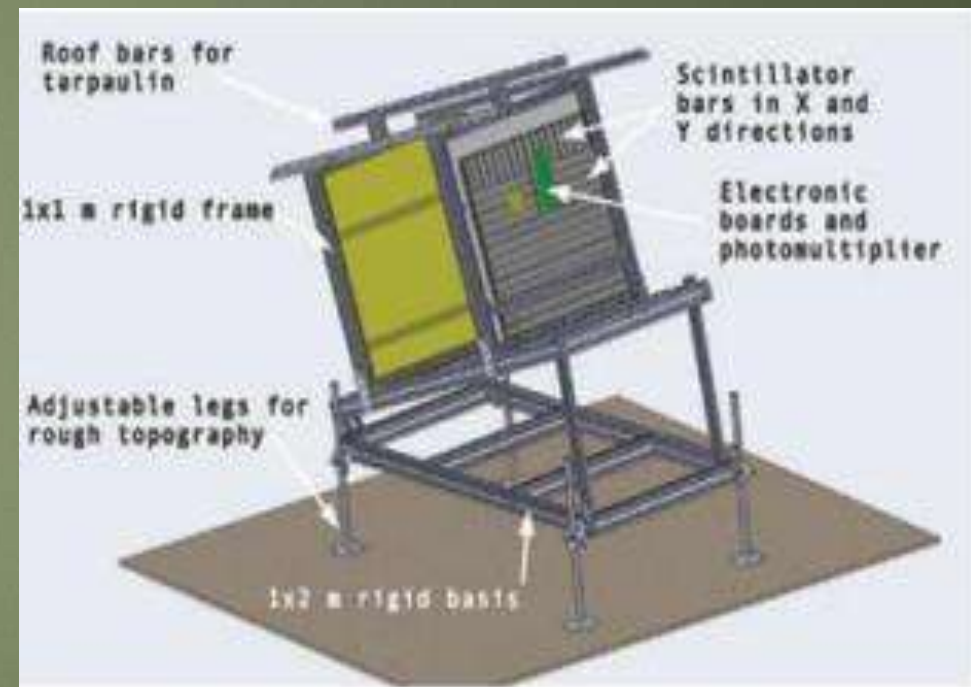


Методы регистрации

Ядерные эмульсии



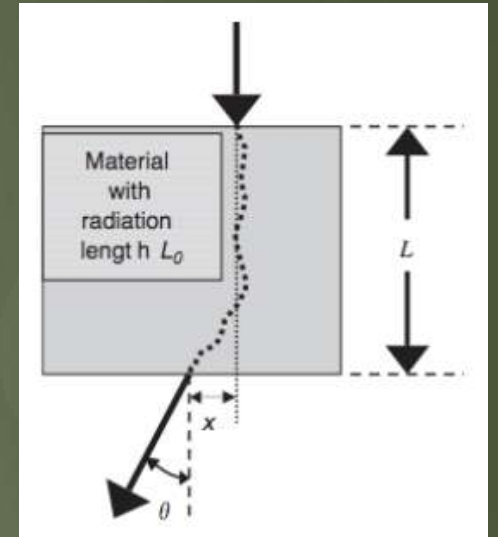
Сцинтилляторы



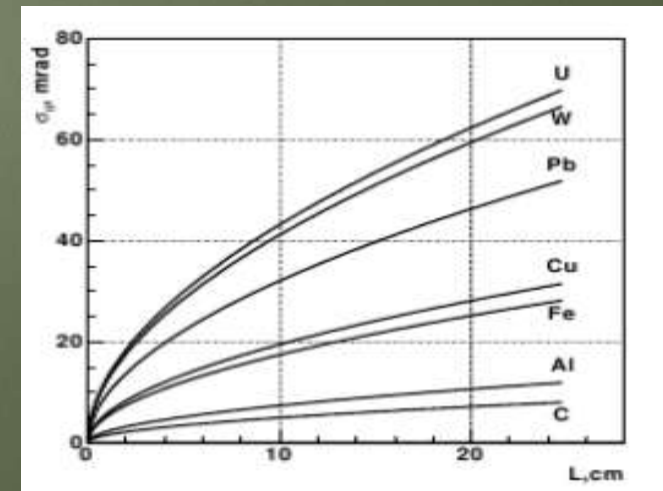
Принцип действия мюонной томографии

- ▶ Длина излучения уменьшается с увеличением атомного номера материала, через которое оно проходит, следовательно, увеличивается угол отклонения θ .

- ▶ $\sigma \approx \frac{1}{p} \sqrt{\frac{L}{X_0}}$ - среднеквадратичное отклонение мюонов

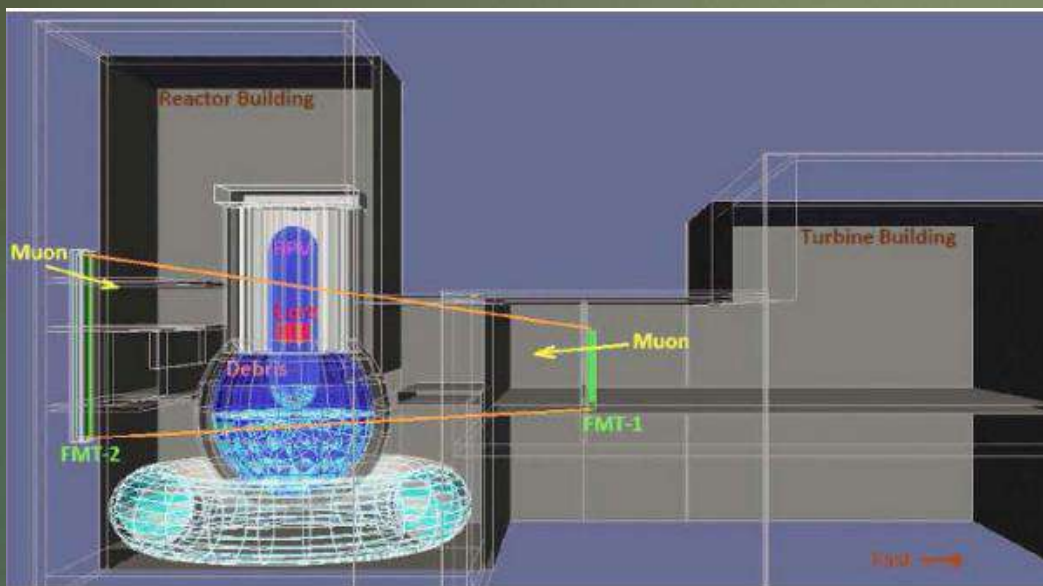


Multiple scattering for muons passing through 10 cm of various materials				RMS of scattering angle		
Material	Z	ρ (g/cm ³)	X_0/ρ (cm)	0.3 GeV/c σ (mrad)	3 GeV/c σ (mrad)	30 GeV/c σ (mrad)
Water	-	1	36,1	26,3	2,6	0,3
Concrete	-		10,7	48,3	4,8	0,5
Iron	26	7,87	1,76	119,2	11,9	1,2
Lead	82	11,34	0,56	211,3	21,1	2,1
Uranium	92	18,97	0,32	279,5	28	2,8



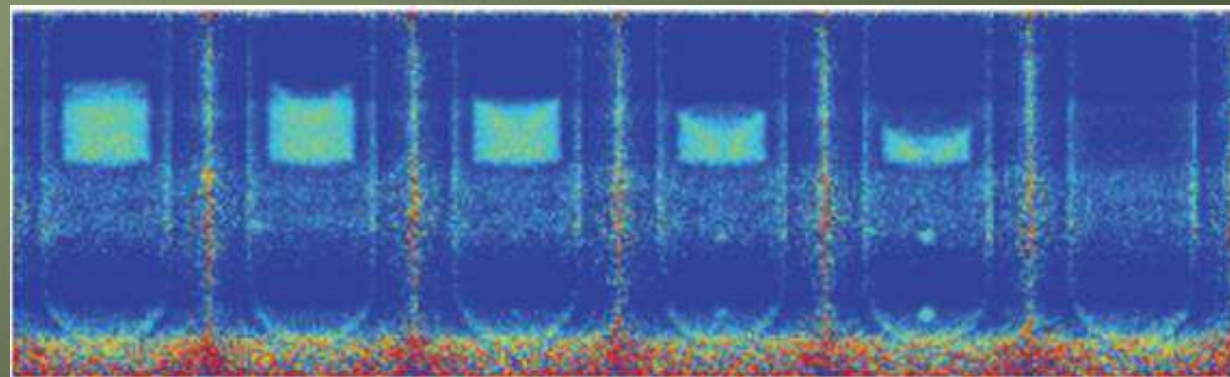
Применение МТ для мониторинга аварийных ситуаций реактора

Схема установки детекторов для оценки ущерба внутри блока АЭС «Фукусима».



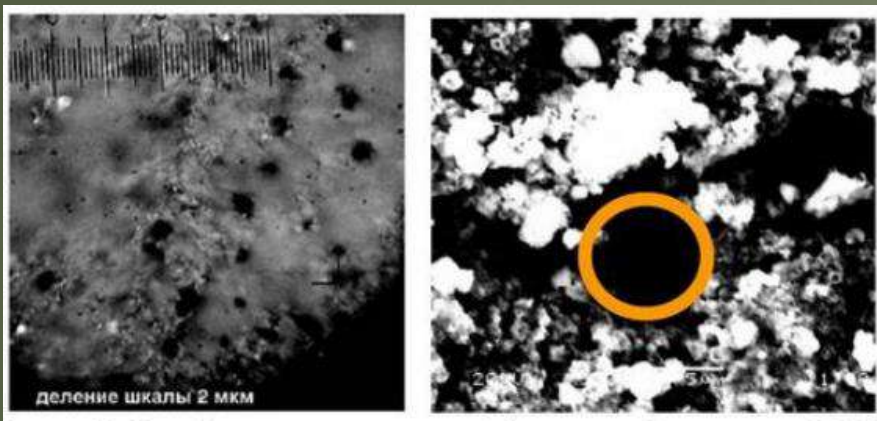
Для оценки ущерба был использован метод рассеивания: два детектора 7×7 метров. Один детектор установлен перед зданием реактора, а второй – на втором этаже здания турбины на противоположной стороне.

Симуляция поврежденного блока АЭС «Фукусима»



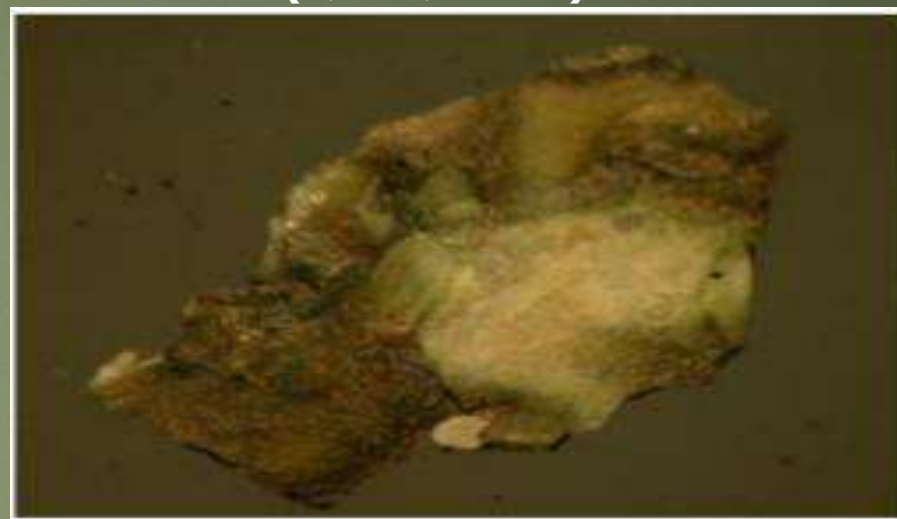
Применение МТ в условиях нормальной эксплуатации

Рельеф поверхности отложений на ТВС



- ▶ В реакторах ВВЭР возможно подкипание теплоносителя в порах отложений в верхней части ТВЭЛОВ.
- ▶ На ВВЭР-440 НВАЭС на ТВС были обнаружены паровые каналы диаметром ~ 6 мкм, а количество на площади $1 \text{ мм}^2 \sim 2000-3000$, что соответствует числу каналов, образующихся при поверхностном кипении.

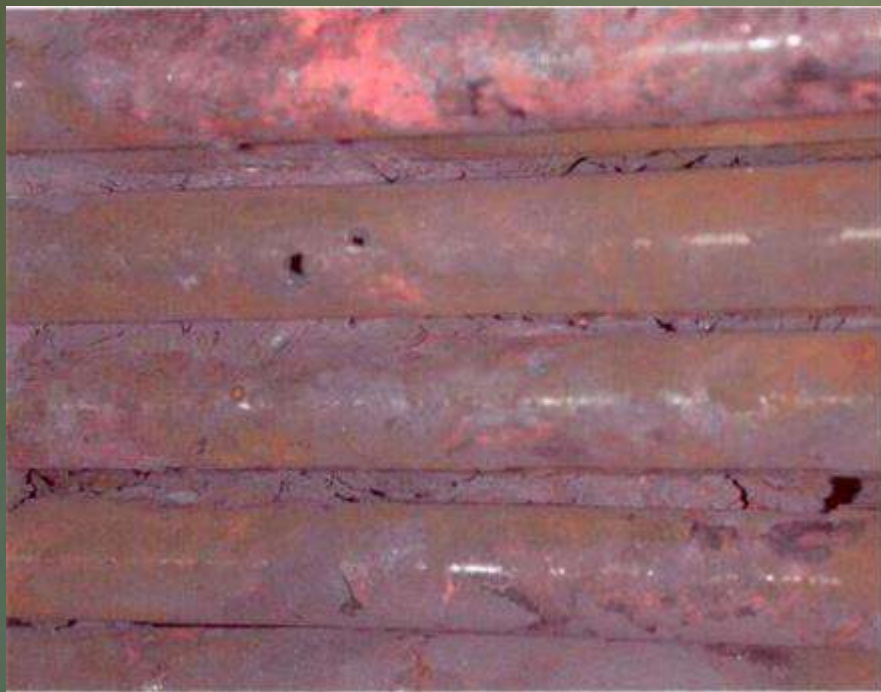
Частица «песка» из Б-С реактора типа РБМК (1,1×0,55 мм)



- ▶ Накоплению «циркониевый песка» подвержены коллекторы ПГ реакторов типа ВВЭР, наличие такого «песка» напрямую влияет на состояние радиационной обстановки.
- ▶ Активность частицы – 5-20 Ки/кг

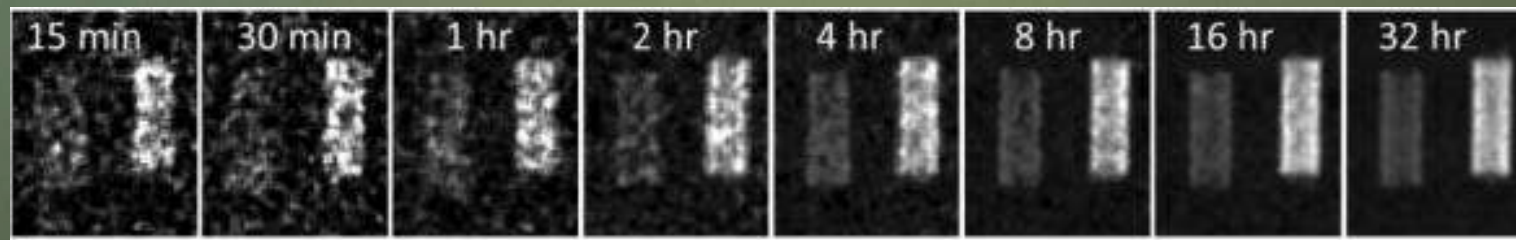
Применение МТ для мониторинга состояния ПГ

Занос трубного пучка медножелезными отложениями



- ▶ ПК поступают из конденсатно-питательного тракта в ПГ, это приводит к оседанию шлама в нижней части парогенератора и отложению на поверхности труб.
- ▶ При отложении более 150 г/см^3 число заглушенных труб увеличивается до 100-1000 и более.

Определение толщины стенок труб из нержавеющей стали при помощи мюонной томографии

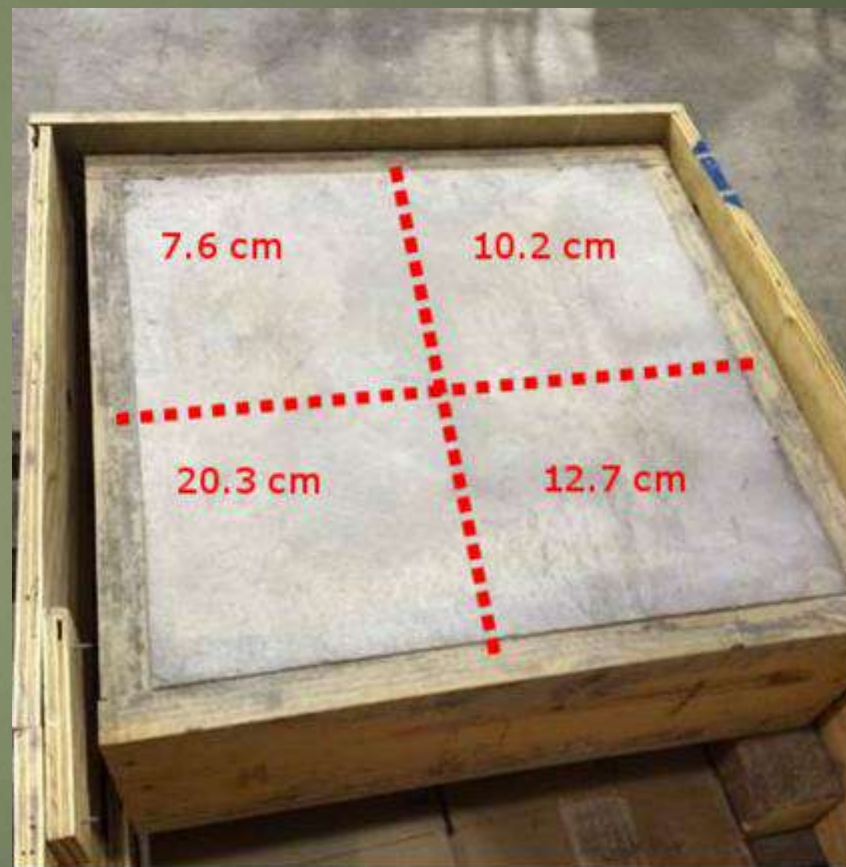


Внешние способы применения МТ

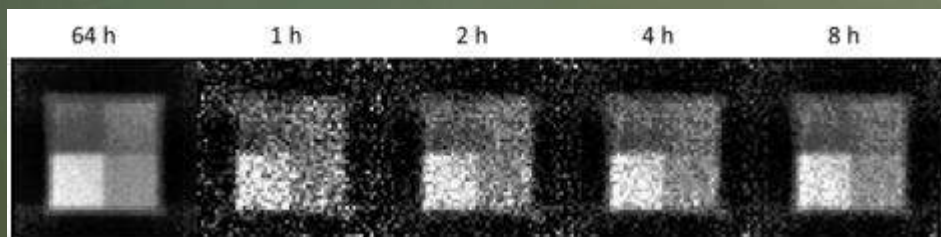
Мини-мюонный трекер в Лос-Аламосе



Обследуемые бетонные блоки



Изображение испытуемого объекта



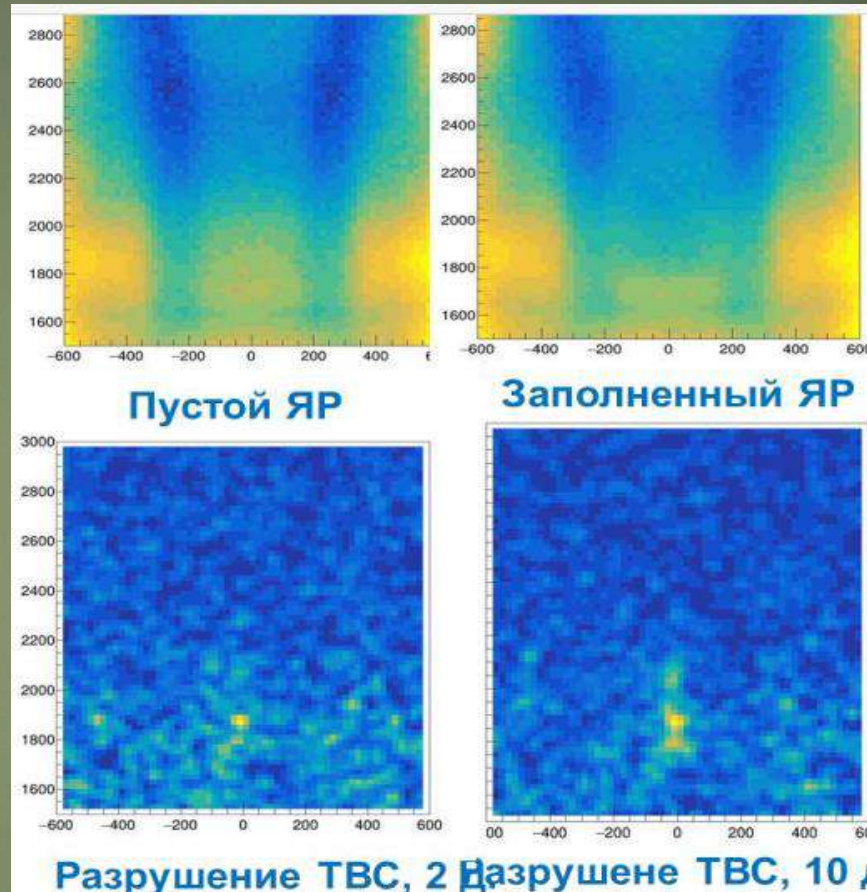
Апробация технологии на российских АЭС

МОСКВА, 14 февраля. /ТАСС/. Калининская АЭС (город Удомля, Тверская область) в июне 2022 года станет пилотной площадкой для внедрения уникальной инновационной технологии мюонной томографии.

Об этом сообщила пресс-служба концерна "Росэнергоатом" (входит в электроэнергетический дивизион Росатома), отметив, что данная технология позволяет повысить безопасность работы крупных промышленных объектов, в том числе атомных станций.



Делегация НИЯУ МИФИ и АО «ВНИИАЭС» на КалАЭС



Результаты моделирования
РУ ВВЭР-1000 в программе Geant4
(данные: сб. АО «ВНИИАЭС»). – М.:
2020г. – 158с., стр. 47-50.

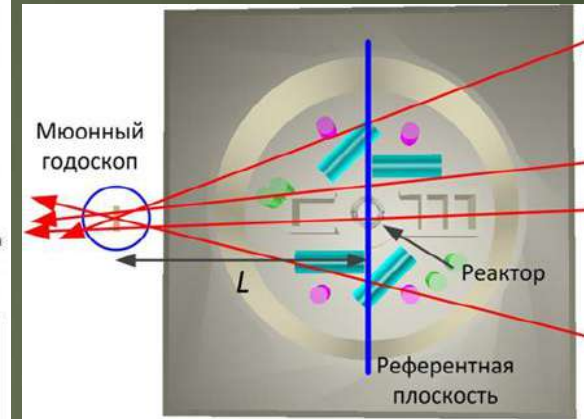


Схема размещения
мюонного детектора

ИТОГИ

- ▶ По результатам расчетов для ВВЭР-ТОИ был сконструирован прямоточный парогенератор с водой в качестве рабочего тела.
 - Мощность: 1620 МВт;
 - Паропроизводительность: 861.9 кг/с;
 - Число труб: 27750;
 - Диаметр корпуса: 3.7 м;
 - Высота корпуса: 12.11 м;
 - Оптимальная скорость теплоносителя: 3.32 м/с;
 - Цена: 935.1 млн. руб;
 - Масса корпуса: 216.72 т.
- ▶ По результатам рассмотрения возможностей применения МТ можно сделать выводы:
 - Использование МТ позволяет получать трёхмерное изображение внутренней структуры объекта;
 - МТ позволяет обнаружить плотные материалы с большим атомным числом, скрытые в большом объеме материала с низким атомным номером;
 - применение мюонной томографии позволяет сократить дозу облучения персонала при демонтаже реакторов после таких мировых катастроф, как авария на АЭС «Фукусима»;
 - МТ может дать возможность отслеживания процесса оседания отложений на поверхности ТВЭЛОВ, на трубках парогенераторов

Спасибо за внимание!



Парогенератор ПГВ-1000У для АЭС с ВВЭР-1000. Методы контроля герметичности поверхности теплообмена парогенератора.

Студент: Никитенко А.А.

Группа: ТФ-12-21

Научный руководитель: Никонов С.М.

Москва 2025

Цель работы



1. Расчет парогенератор ПГВ-1000У.
2. Рассмотрение методов контроля герметичности поверхности теплообмена ПГ.

Исходные данные:

1. Давление теплоносителя:
15.7 МПа
2. Температура теплоносителя на входе: 322 °С
3. Температура теплоносителя на выходе: 292 °С
4. Давление генерируемого пара:
6.27 МПа
5. Температура питательной воды:
220 °С
6. Паропроизводительность: 408 кг/с



Результаты расчетов



Характеристика	Значение
Тепловая мощность, МВт	750,56
Число теплопередающих труб	9987
Средняя длина труб, мм	17620
Площадь ТПП, м ²	8048
Масса ПГ, т	185,64
Цена ПГ, млн. руб.	602,5

Контроль герметичности при нормальной эксплуатации АЭС

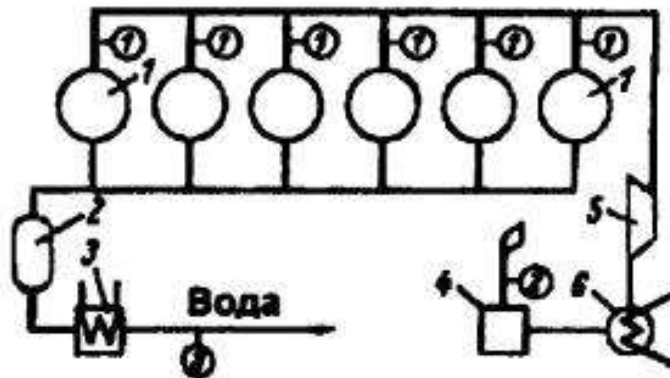


Рис. 4.4.3. Схема расположения точек радиационного контроля второго контура блока с реактором ВВЭР:

1 – парогенератор; *2* – расширитель; *3* – теплообменник; *4* – эжектор; *5* – турбина; *6* – конденсатор; в кружочках – точки контроля

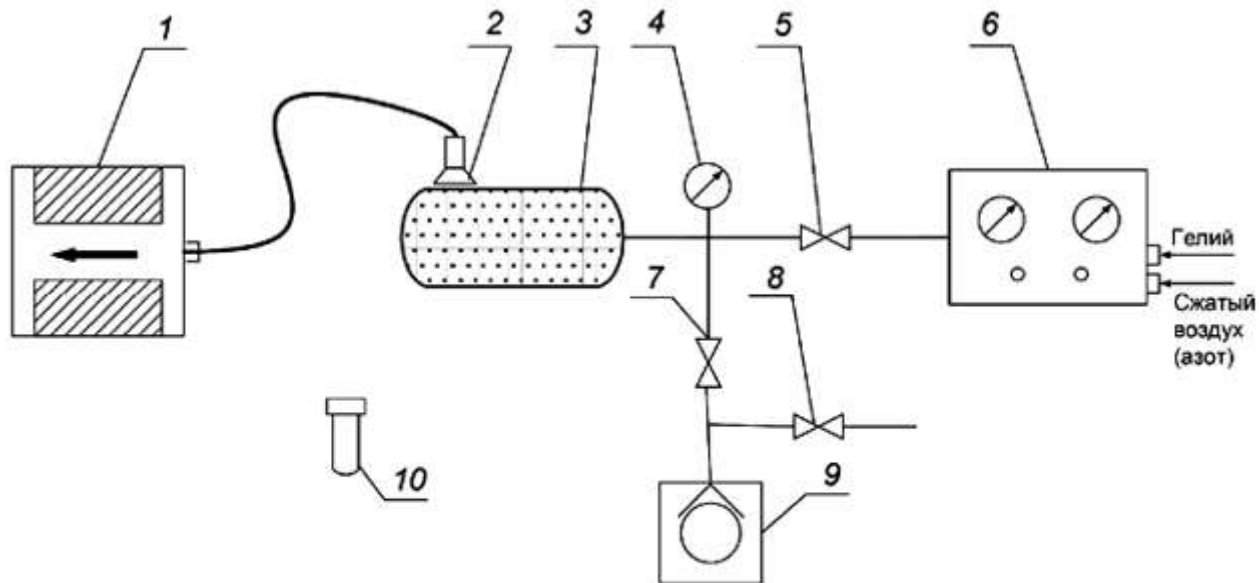
Контроль герметичности при плановом обслуживании



Методы контроля:

- Масс-спектрометрический
- Галогенный,
- Пузырьковый,
- Гидравлический,
- Люминесцентногидравлический,
- Гидростатический,
- Капиллярный,
- Манометрический.

Способ щупа

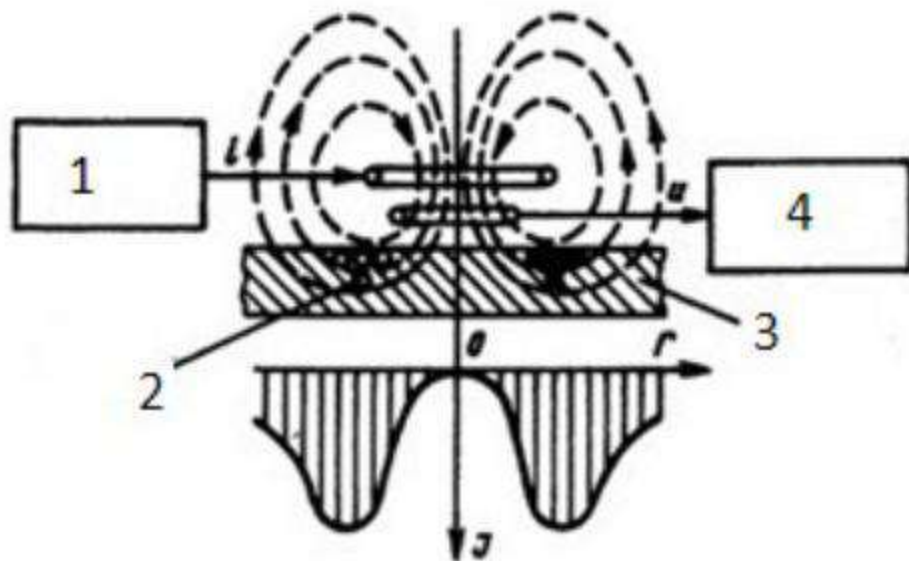


1 - теченскатель; 2 - щуп; 3 - ОК; 4 - мановакуумметр; 5, 7, 8 - клапаны; 6 - пневмопульт; 9 - вакуумный насос; 10 - контрольная течь.

Контроль гидравлическим способом с люминесцентным индикаторным покрытием



Вихретоковой контроль



- 1 – катушка индуктивности;
- 2 – вихревые токи;
- 3 – объект контроля;
- 4 – приёмный измеритель;

Выводы



1. Был произведен расчет ПГ ПГВ-1000У и выбраны оптимальные параметры.
2. Были рассмотрены методы контроля герметичности поверхности теплообмена ПГ при нормальной эксплуатации и при плановом обслуживании



Спасибо за внимание

АККУМУЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГИИ НА АЭС: повышение гибкости и эффективности

Традиционно атомные электростанции работают в базовом режиме, поддерживая постоянную мощность. Однако интеграция АЭС в современные энергосистемы требует большей манёвренности для компенсации колебаний от возобновляемых источников. Решением этой задачи становятся технологии аккумулирования энергии, которые позволяют станции накапливать излишки произведённой энергии и выдавать её в сеть в периоды пикового спроса.

Наиболее перспективным и масштабным методом является термохимическое или тепловое аккумулирование. Избыточная тепловая энергия, вырабатываемая реактором, используется для нагрева и плавления специальных материалов (например, солей или металлов). Этот расплав может храниться в теплоизолированных ёмкостях в течение многих часов или даже дней. При необходимости накопленное тепло преобразуется обратно в пар, который направляется на турбину для выработки электроэнергии, не требуя при этом изменения мощности самого реактора.

Одной из перспективных технологий является криогенное аккумулирование (LAES – Liquid Air Energy

Storage) – процесс, при котором в ночные периоды избытка электроэнергии она расходуется на сжижение воздуха, а дневные (пиковые) часы воздух разжижается и подается на газовую турбину для выработки электроэнергии.

Системы аккумулирования могут быть также использованы при создании перспективных систем аварийного энергоснабжения на основе тепловых аккумуляторов (САЭ-ТА), которые являются более надежной альтернативой традиционным резервным дизельным электростанциям (РДС).

Студенты кафедры АЭС в рамках бакалаврских работ разрабатывают элементы различных систем теплового аккумулирования, а также исследуют вопросы их применения.



НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ



Расчет модернизированного варианта прямоточного ПГ для САЭ-ТА энергоблока ВВЭР-1000

Студентка: Семёнова Е. П.

Группа: ТФ-11-16

Научный руководитель: Каверзнев М.М.

Москва, 2020

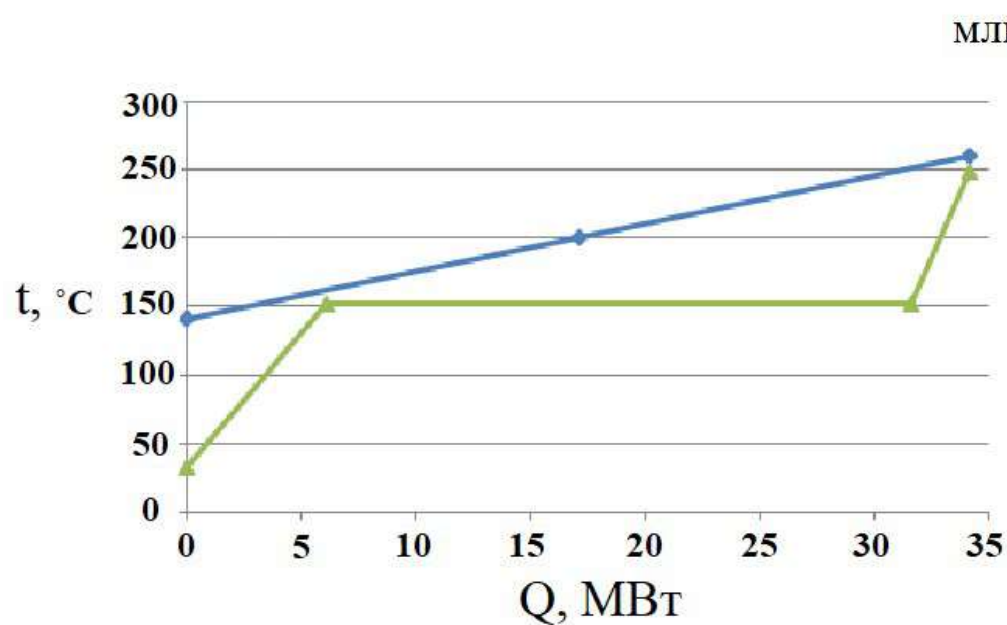
Исходные данные для расчета

<i>Характеристика</i>	<i>Значение</i>
Паропроизводительность ПГ , кг/с	12,1
Температура теплоносителя, °С на входе в ПГ	260
на выходе из ПГ	140,9
Давление теплоносителя, МПа	0,4
Температура питательной воды, °С	33
Температура пара, °С	249,4
Давление питательной воды, МПа	0,5

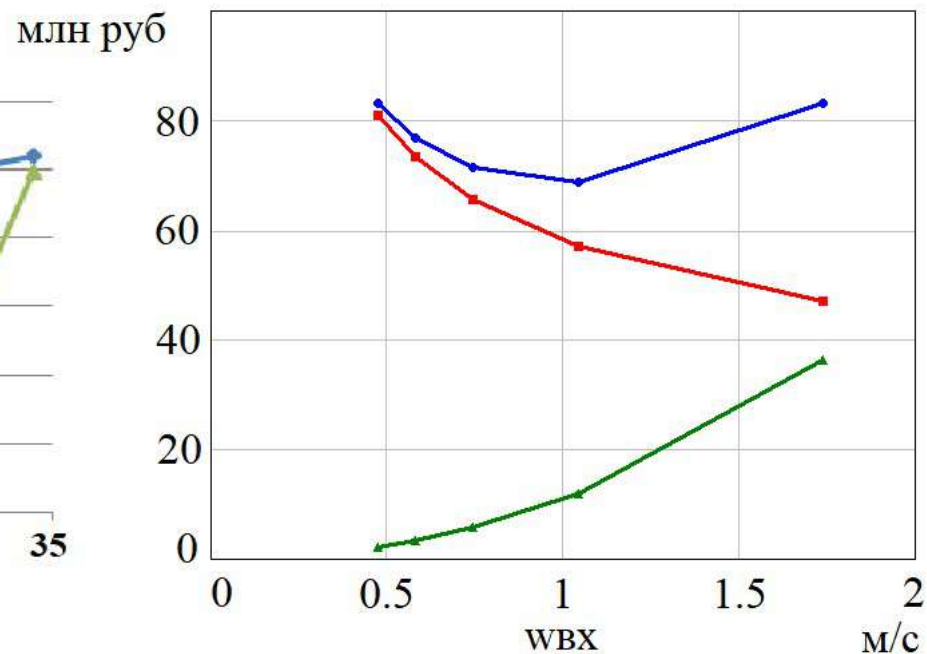
Выбор конструкционных материалов

<i>Деталь</i>	<i>Марка стали</i>
Корпусные детали	10ГН2МФА
Трубы теплопередающей поверхности	08Х14МФ
Трубная доска	10ГН2МФА

t, Q – диаграмма и выбор оптимальной скорости теплоносителя



—▲ - рабочее тело
—◆ - ВТТ



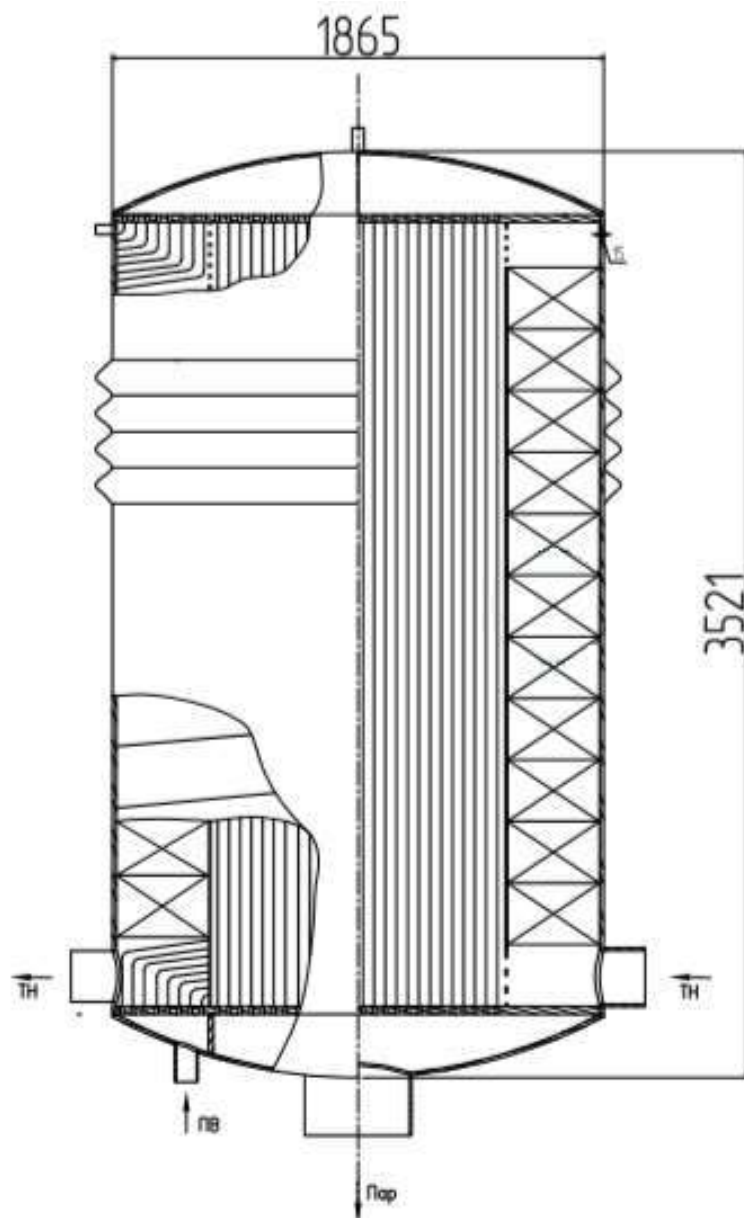
—◆ З – приведенные затраты

—■ Sk – капитальная составляющая
 приведенных затрат

—▲ Sэ – приведенные затраты на
 электроэнергию

Конструкция ПГ

и основные технико-экономические характеристики



<i>Характеристика</i>	<i>Значение</i>
Тепловая мощность, МВт	34.1
Площадь теплопередающей поверхности, м ²	495.4
Паропроизводительность, кг/с	12.1
Параметры пара (давление/температура), МПа/ °С	3.9/249.4
Число труб эк/пп, шт	200/2000
Длина труб эк/пп, м	42.6/3,0
Основные габариты, высота/диаметр, мм	3521/1865
Масса, т	5.71
Цена, млн руб	32.8

Анализ вариантов теплового аккумулятора для САЭ-ТА энергоблока ВВЭР-1000

Актуальность темы

Накопление энергии является одним из способов снизить пиковые нагрузки и уменьшить необходимую мощность электростанций в энергосистеме.

С развитием ВИЭ (возобновляемых источников энергии) роль аккумулирования резко возросла, став одним из условий ускоренного развития нетрадиционной энергетики.

Существует множество способов косвенного аккумулирования энергии, среди них тепловое аккумулирование (ТА) является одним из самых дешёвых.

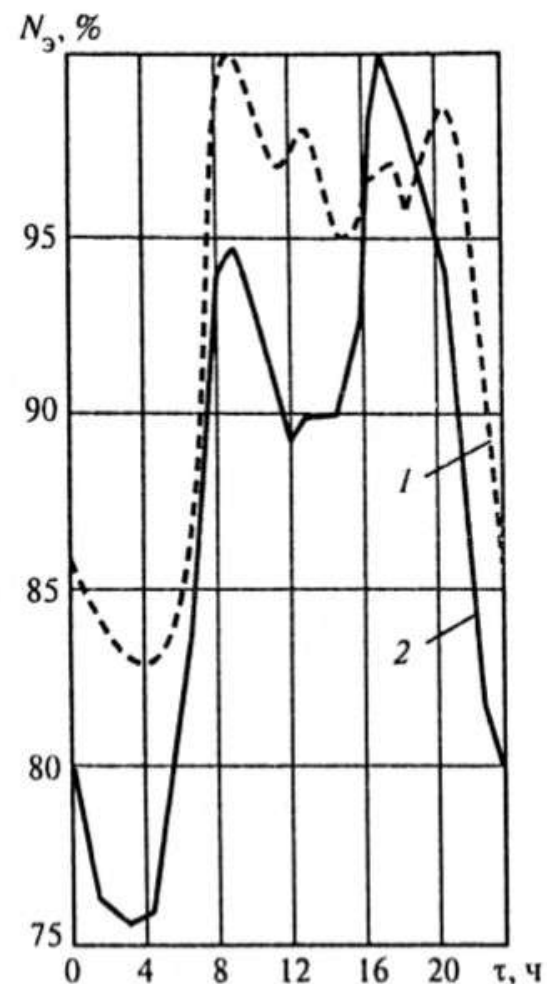
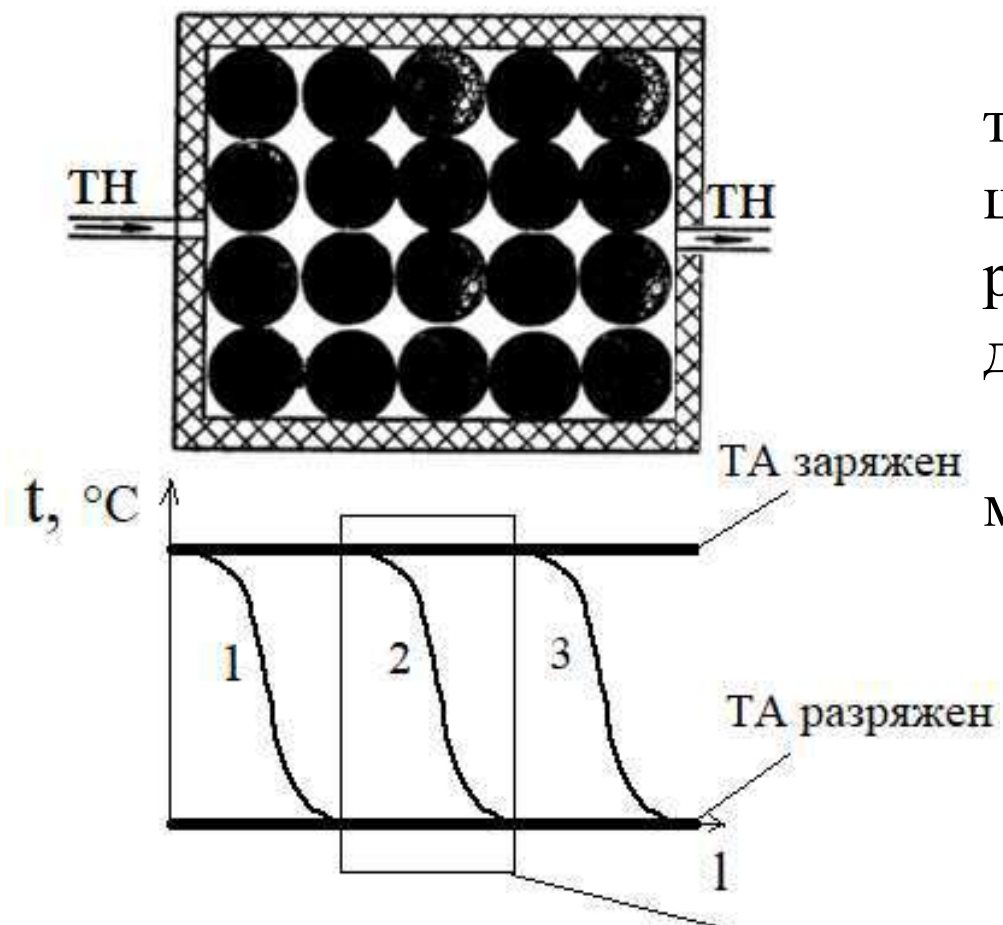


Рис. 2.1. Суточный график электрической нагрузки энергетической системы: 1 — лето; 2 — зима

Постановка задачи



Рассмотреть 3 варианта теплового аккумулятора с шаровой засыпкой из 3 различных материалов с разным диаметром шаров.

Оценить удельную тепловую мощность аккумуляторов.

1, 2, 3 – распределение теплового фронта в ТА в разные моменты времени

Темп зарядки/разрядки ТА (тепловая мощность ТА) определяется процессами нестационарной теплопроводности в зоне прогрева шаров.

Этим продиктована тема исследования.

Модель расчёта

Тепловая мощность определяется темпом прогресса шарика засыпки.
Для оценки скорости прогресса необходимо рассчитать распределение температур по радиусу шара по времени.

$$(1) T := T_c - \frac{D}{6} \cdot (T_c - T_0) \left[\frac{Bi + 2}{Bi} - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right] \cdot e^{(-D \cdot F_0)}, \text{ где:}$$

$$(2) Bi := \frac{\alpha R}{\lambda} \quad (3) F_0 := \frac{\alpha}{R^2} \quad (4) \alpha := Nu \cdot \frac{\lambda}{R}$$

$$(5) Nu := 0.67 \cdot \left[Ra \cdot \left(1 + \frac{0.492}{Pr} \right)^{\frac{-16}{9}} \right]^{0.25}$$

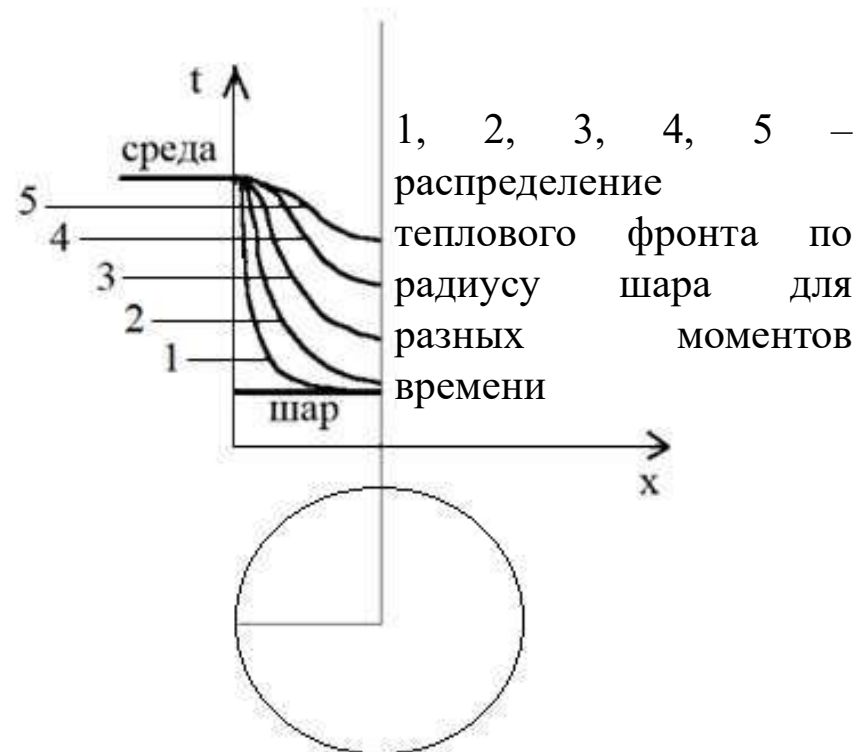
$$(6) Ra := Gr \cdot Pr$$

$$(7) D := \frac{21(Bi + 5) \cdot Bi}{2Bi^2 + 14 \cdot Bi + 35}$$

$$(8) Q := 4 \cdot \pi \cdot R^2 \cdot \lambda \cdot (T_c - T_t)$$

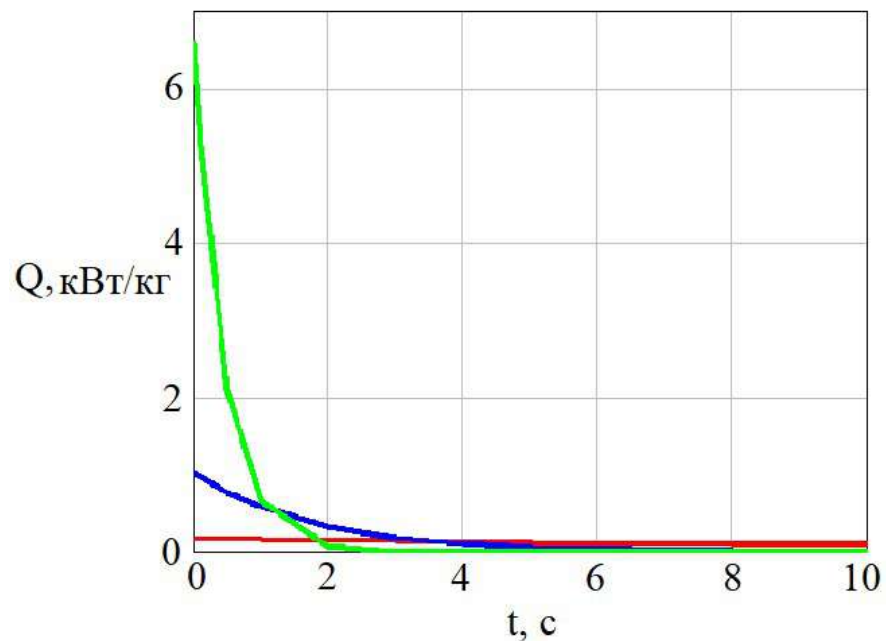
- Ф-ла Ньютона-Рихмана

$$(9) Q_m := \frac{Q}{\rho \cdot \frac{4}{3} \cdot 0.1^3 \cdot \pi} \quad \text{- Удельное значение тепловой мощности на ед. массы}$$



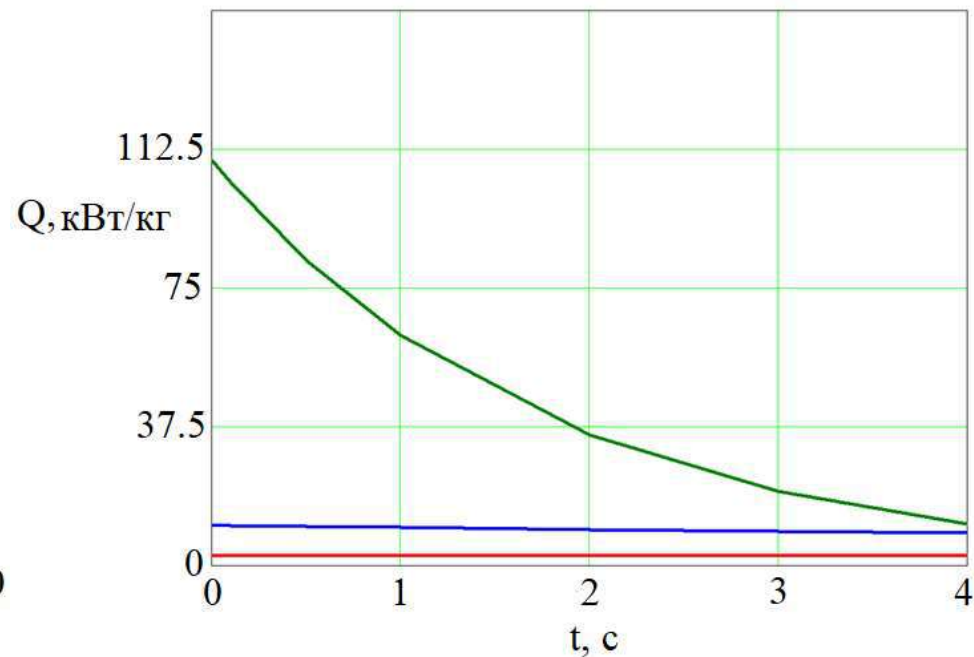
Зависимость удельной мощности ТА от времени

для разных материалов



Q — засыпка – гранит
Q — засыпка – чугун
Q — засыпка – кремний
Радиус – 0.025 м.

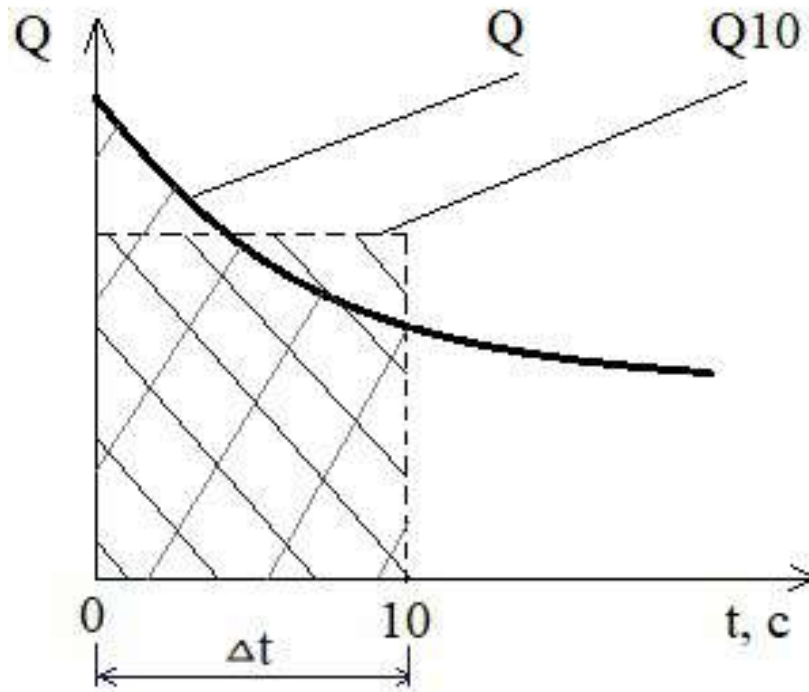
для разных размеров



Q — радиус – 0.1 м
Q — радиус – 0.025 м
Q — радиус – 0.0025 м
Засыпка – гранит.

Итоговые оценки

Модель осреднения



$$Q_{10} = \frac{\int Q(t)dt}{\Delta t}$$

Средняя удельная тепловая мощность ТА
(МВт/м³ за первые 10 секунд зарядки)

<i>Материал шариков</i>	<i>Мощность, МВт/м³</i>	<i>Диаметр, мм</i>
Гранит	42...327	100...2.5
Чугун	49...712	100...2.5
Кремний	77...831	100...2.5

Результаты могут быть полезны при разработке ТА с засыпкой.

Выводы

1) Разработана конструкция ПГ для САЭ-ТА:

- Тепловая мощность – 34,1 МВт
- Масса – 5,71 т.
- Цена – 32,8 млн. руб.

2) Анализ вариантов теплового аккумулятора для САЭ-ТА показал: в зависимости от материала и степени дробления засыпки, ТА развивает удельную тепловую мощность:

- Гранит – 42...327 МВт/м³
- Чугун – 49...712 МВт/м³
- Кремний – 77...831 МВт/м³

для характерного размера засыпки (радиуса шарика) 100...2,5 мм.

Данные оценки могут быть полезны при разработке проточных ТА с шаровой засыпкой из разных материалов.



НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ



Расчет ПГ системы аварийного энергоснабжения на тепловых аккумуляторах на НКРТ

Студент: **Поленок Е.А.**

Группа: **ТФ-12-21**

Научный руководитель: **Каверзнев М.М.**

Москва, 2025

Системы аварийного энергоснабжения энергоблоков АЭС САЭ ВВЭР-1000

В качестве автономных источников электропитания на АЭС выступают резервные дизельные электростанции (РДС), обеспечивающие генерацию энергии в случае нарушения штатного энергоснабжения вспомогательных систем ядерных энергоблоков.

Для энергоблоков ВВЭР-1000 в качестве аварийного электроснабжения предусмотрены источники автономного электроснабжения: автоматизированные РДС и агрегат бесперебойного питания на основе аккумуляторных батарей (по 3 на каждый энергоблок).

Достоинства:

- освоенная технология.

Недостатки:

- имеется риск незапуска;
- перерыв в питании ~15 секунд (время развертки), полная мощность развивается за 45 секунд;
- неиспользуемая в нормальной эксплуатации система, что вызывает простой оборудования.

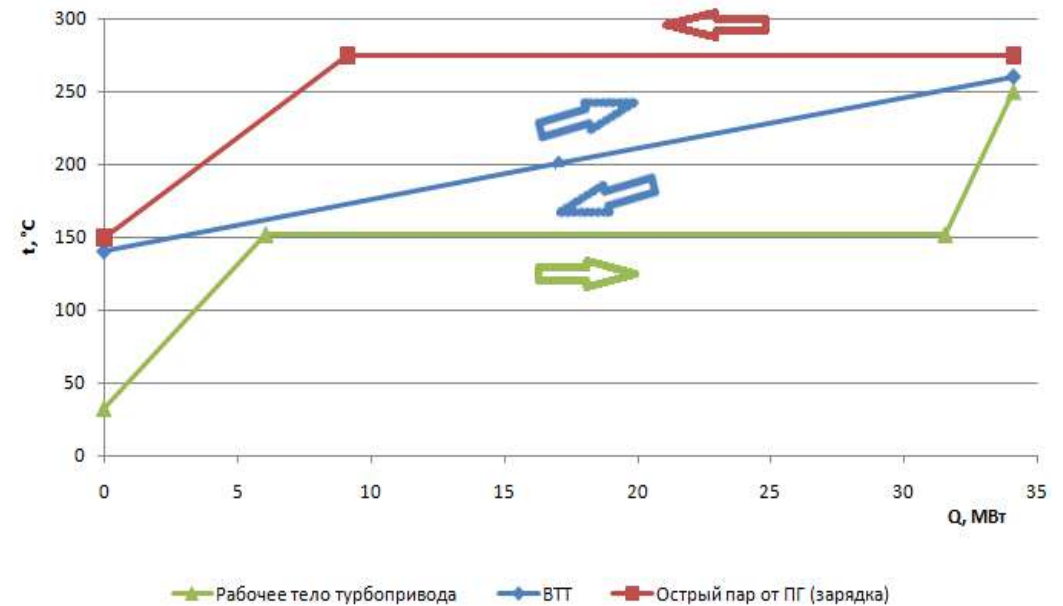
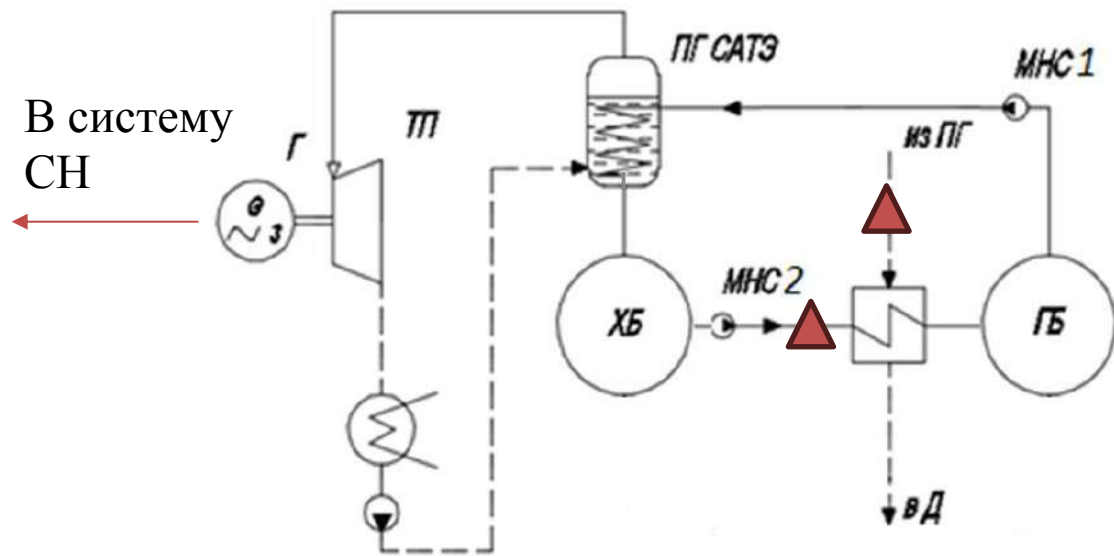


Альтернатива штатной САЭ:

Система аварийного энергоснабжения на тепловых аккумуляторах (САЭ-ТА)

В качестве одной альтернатив РДС рассматривается система аварийного энергоснабжения на тепловых аккумуляторах.

Схема обеспечивает непрерывную подзарядку ТАК и продолжение функционирования в случае обесточивания, прекращения подачи пара от ПГ, без переключений.



▲ – отключается при полном обесточивании

Процесс теплообмена между греющим паром, ВТТ и рабочим теплом ТП

Варианты конструктивных схем ПГ САЭ-ТА

При рассмотрении ПГ на воде возникала проблема в виде большой разницы плотностей пара и воды (~500 раз) при низких давлениях (~0,5МПа), что потребовало разделения ПГ на 2 корпуса с разным числом труб разной длины. Вариант колокольчик был отвергнут из-за сильной разницы длин частей, на смену ему пришла катушка.

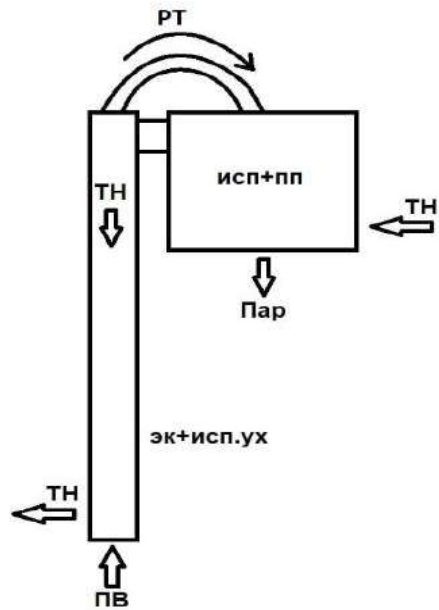


Схема
«Колокольчик»

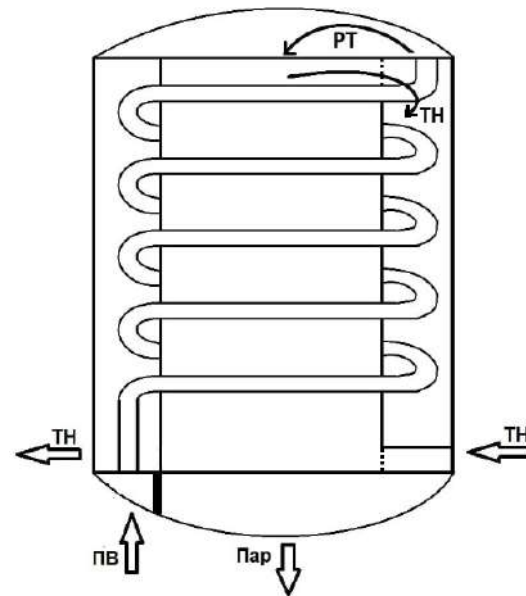


Схема
«Катушка»

Одной из причин выбора в качестве рабочего тела диоксида углерода в данной работе послужило то, что он не имеет фазовых переходов в сверхкритическом состоянии и имеет относительно малое изменение плотности.

Это позволяет создать конструкцию ПГ с простым трубным пучком, без деления на части и усложнения конструкции.

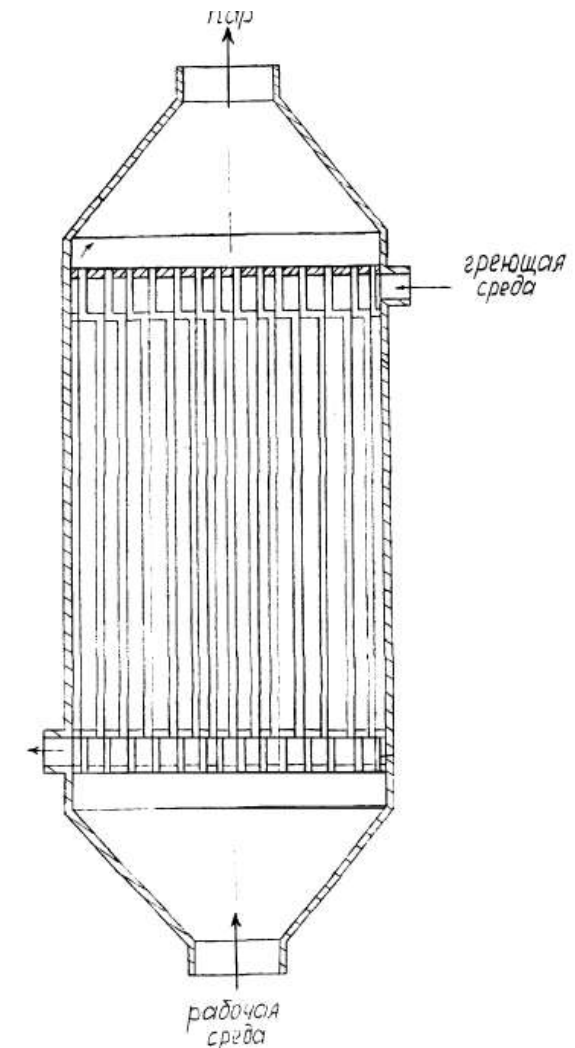
Исходные данные для расчета

<i>Характеристика</i>	<i>Значение</i>
Расход рабочего тела, кг/с	109,66
Температура ВТТ на входе в ПГ, °С	260
Температура ВТТ на выходе из ПГ, °С	75
Температура sCO ₂ на входе в ПГ, °С	65
Температура sCO ₂ на выходе из ПГ, °С	249,1
Давление ВТТ, МПа	20
Давление sCO ₂ , МПа	0,4

Выбор конструкционных материалов

<i>Деталь</i>	<i>Марка стали</i>
Корпусные детали	10ГН2МФА
Трубная доска	10ГН2МФА
Трубы теплопередающей поверхности	08Х14МФ

Конструктивная схема
прямоточного ПГ

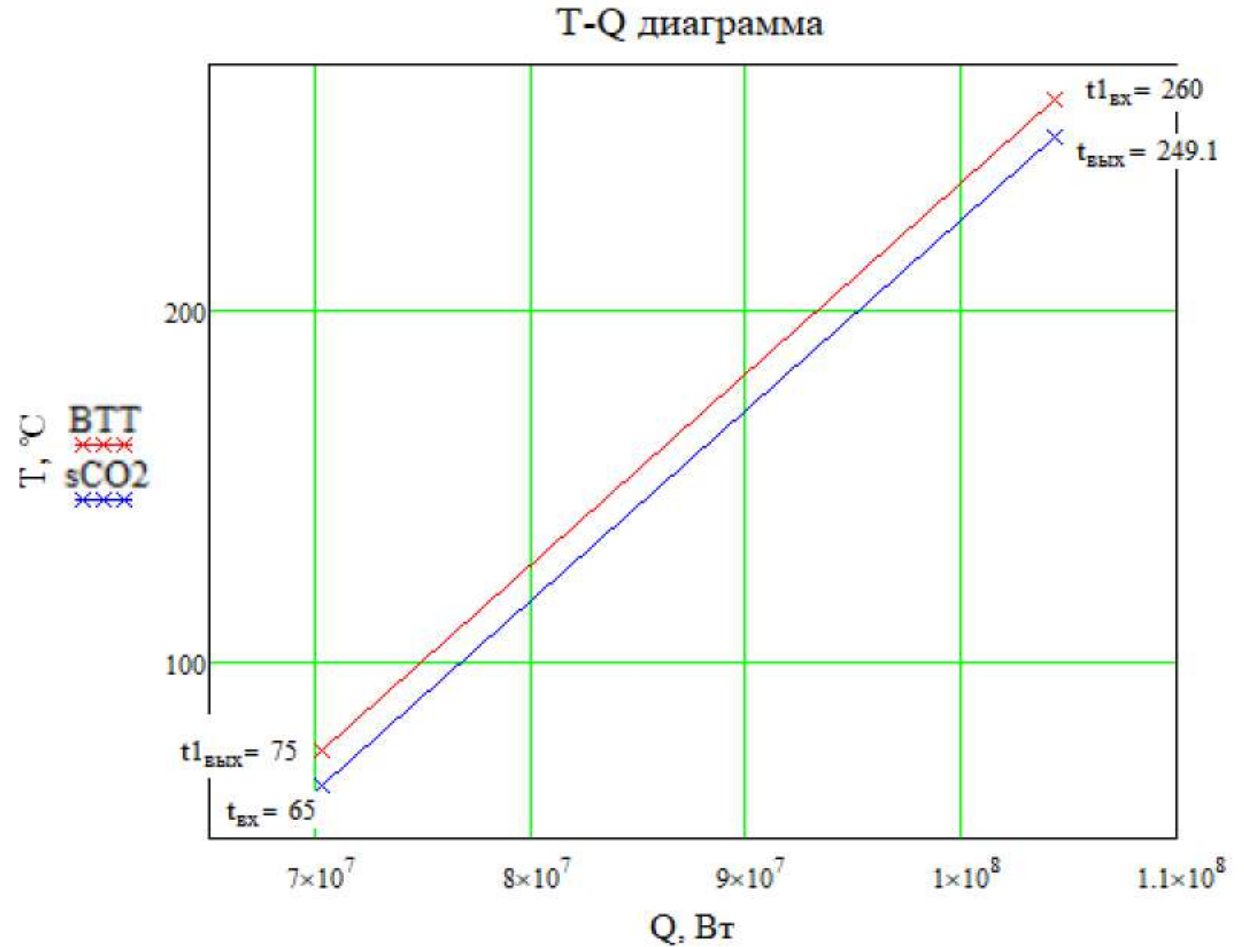


T, Q – диаграмма и этапы расчета

В ходе работы были проведены:

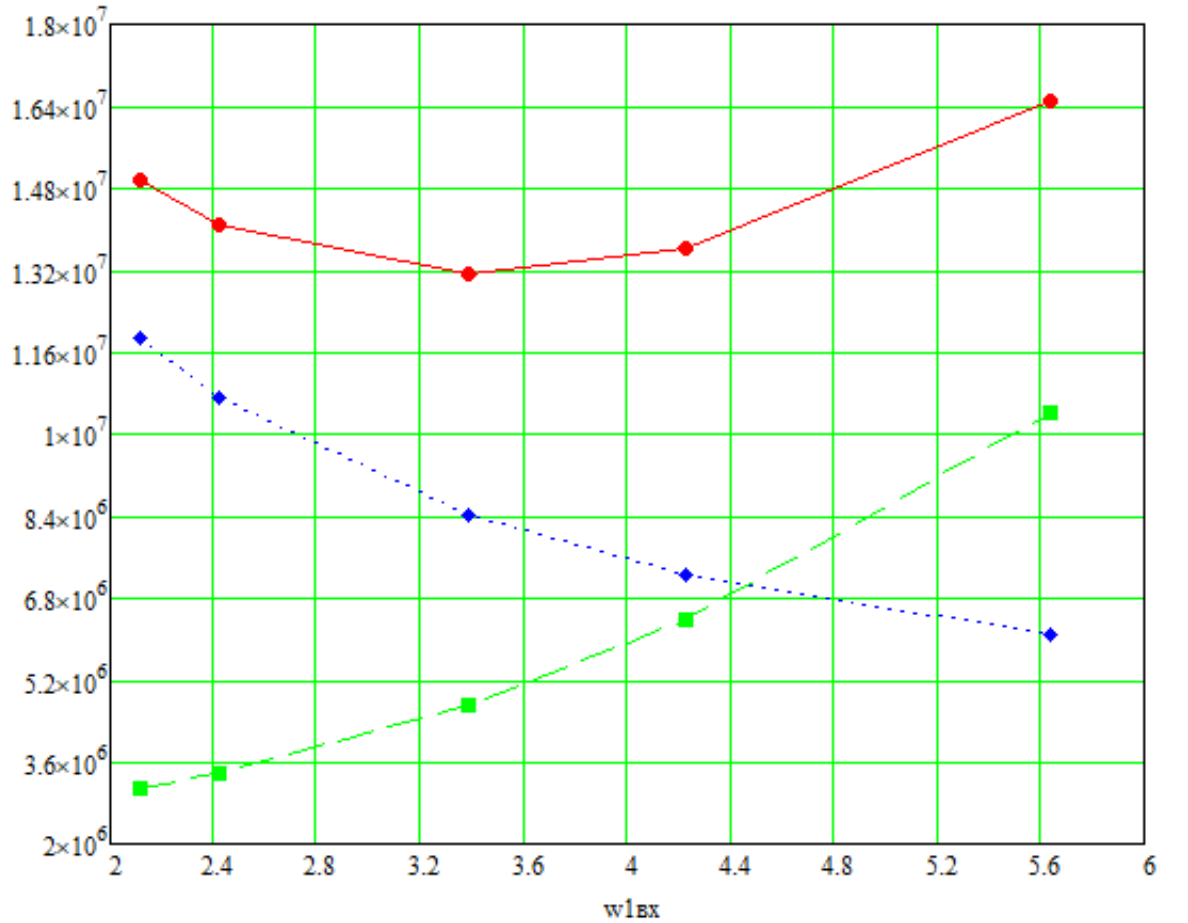
- 1) Тепловой расчет
- 2) Конструкционный расчет
- 3) Гидродинамический расчет
- 4) Экономический расчет

В рассматриваемом тепловом расчете имеется всего один участок – участок нагрева однофазной жидкости



Результаты оптимизации

Ежегодны приведенные затраты руб/год

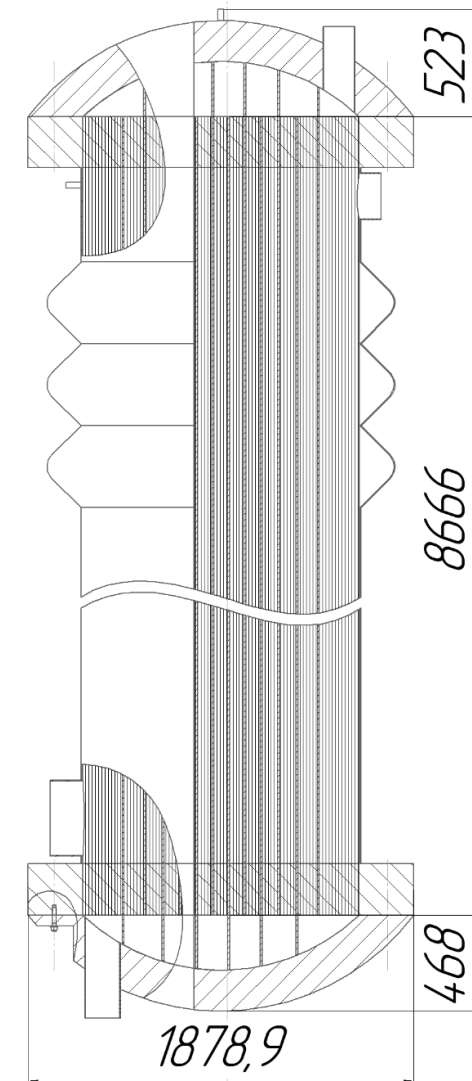


Скорость ТН м/с

- Z – приведенные затраты
- S_k – капитальная составляющая приведенных затрат
- S_e – приведенные затраты на электроэнергию

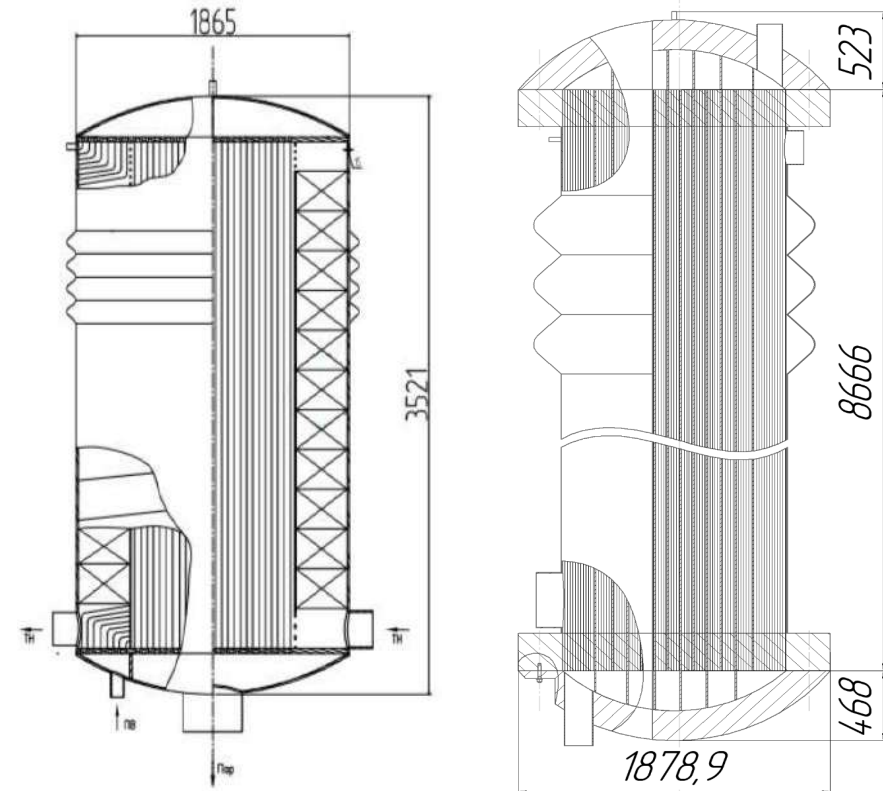
Основные технико-экономические характеристики

<i>Характеристика</i>	<i>Значение</i>
Тепловая мощность, МВт	34,1
Площадь теплопередающей поверхности, м ²	1924
Расход РТ, кг/с	109,66
Число труб в пучке/всего, шт	555/7215
Длина труб пучка/одного хода, м	112,67/8,669
Основные габариты, высота/диаметр, мм	9657/1878,9
Масса, т	28,779
Цена, млн.руб	38,7



Сравнение ПГ на sCO₂ и ПГ на воде

<i>Характеристика</i>	<i>ПГ на воде</i>	<i>ПГ на SCO₂</i>
Тепловая мощность, МВт	34,1	34,1
Площадь ТПП, м ²	495,4	1924
Расход РТ, кг/с	12,1	109,66
Число труб в эк/пп (вода) и трубном пучке/корпусе (SCO ₂), шт	200/2000	555/7215
Длина труб эк/пп, м	42,6/3,0	112,67/8,669
Основные габариты, высота/диаметр, мм	3521/1865	9657/1879
Масса, т	5,71	28,779



Как видно из таблиц, идея создать ПГ САЭ-ТА на SCO₂ с лучшими массогабаритными характеристиками оказалась неудачной. ПГ получился в 4,5 раза тяжелее, площадь т/о поверхности выросла в 4 раза, высота увеличилась в 3 раза.

Причины:

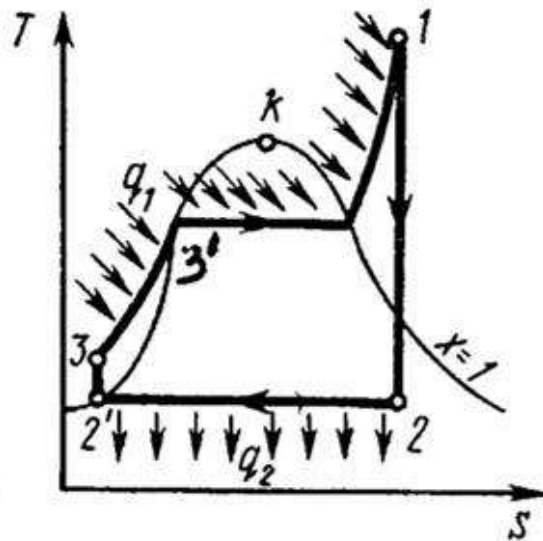
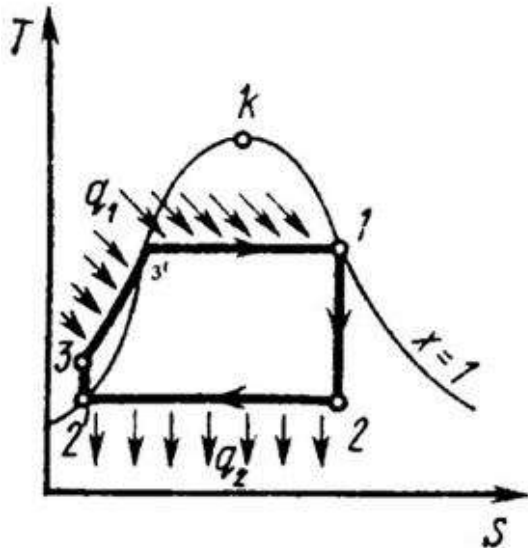
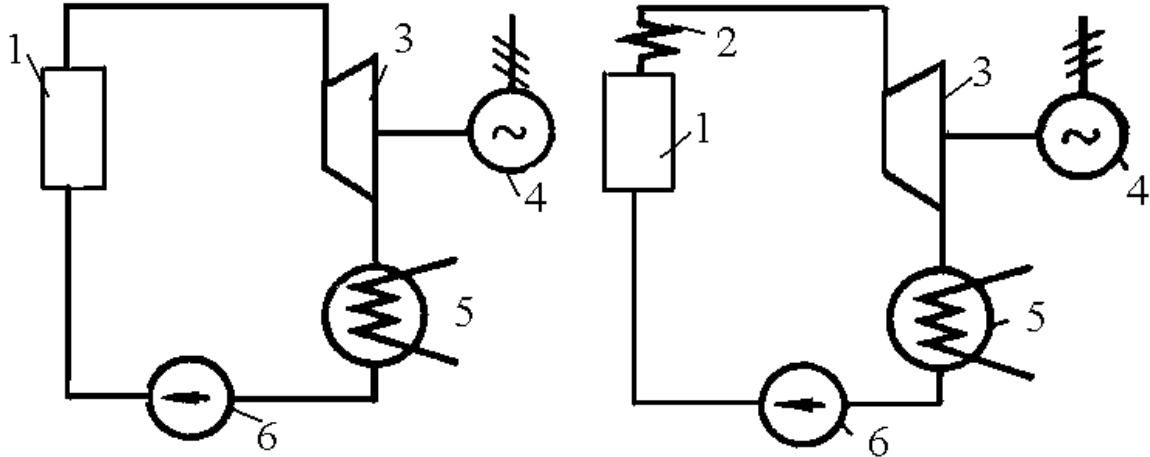
- более низкий коэффициент теплоотдачи от SCO₂ к стенке (примерно в 2 раза);
- более низкий средний температурный напор (примерно в 2 раза);
- значительно более высокое давление РТ, что привело к толстым трубным доскам и крышкам.

Окончательный вывод о целесообразности применения того или иного РТ в ПГ САЭ-ТА необходимо делать с учетом рассмотрения всей конструкции САЭ-ТА, т.к. необходимо учитывать КПД цикла, температурного диапазона ВТГ и цены всей системы

Преимущества и недостатки применения НКРТ на АЭС

Рабочие тела и циклы современных АЭС: вода и цикл Ренкина

Цикл Ренкина на насыщенном и перегретом паре:



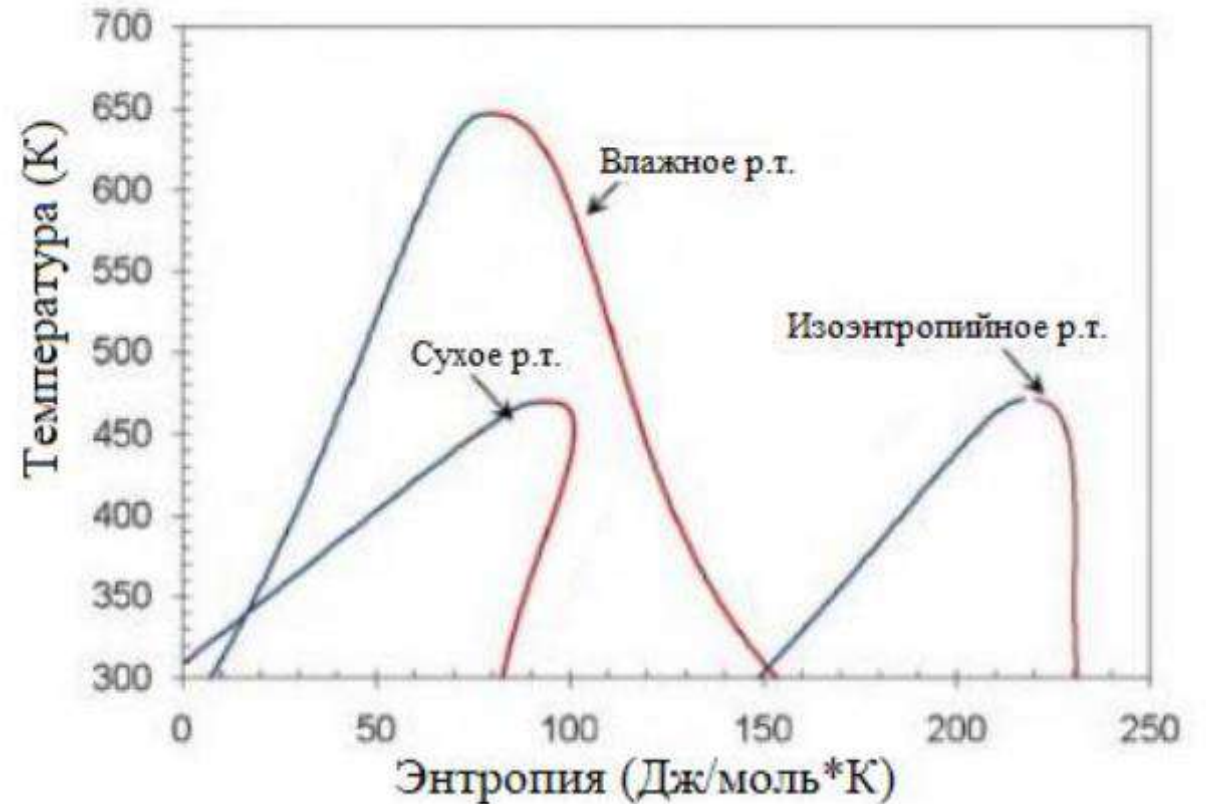
Недостатки воды как рабочего тела

- 1) слишком сильная зависимость плотности от температуры;
- 2) вода является хорошим растворителем и коррозионно активна;
- 3) обладает высокой температурой кипения (конденсации);
- 4) к последним ступеням турбины повышается влажность пара, что требует дополнительных затрат на установку сепараторов-пароперегревателей (СПП).

Возможная альтернатива:

«сухие» рабочие тела с низкой температурой кипения – фреоны

Преимущества теплофизических свойств фреона как РТ перед водой можно отобразить в T,s -диаграмме, а именно в наклоне кривой сухости, которая влияет на конечную влажность пара рабочего тела на выходе из турбины. У воды он отрицательный и наибольший по модулю, поэтому после прохождения ЦНД пар влажный



Альтернативные рабочие тела и циклы: фреоны

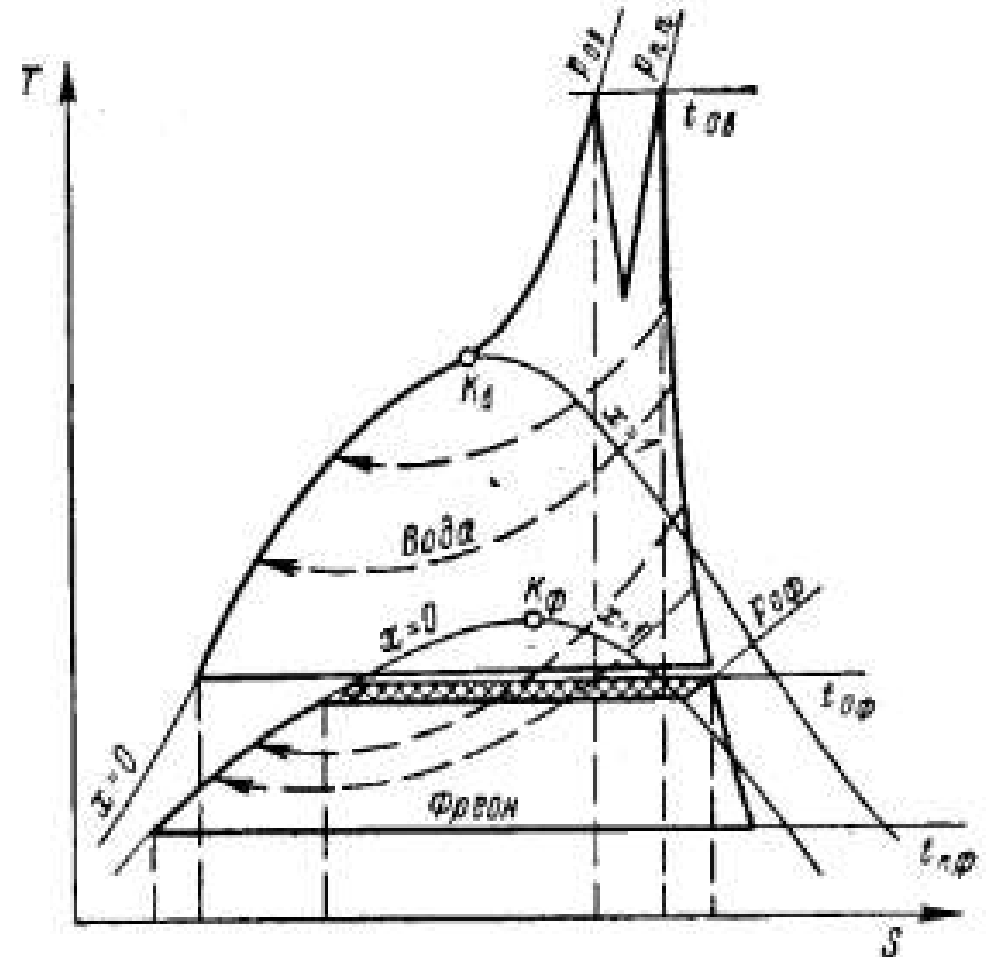
Достоинства фреонов:

- низкие критические параметры;
- близкий к нулю, а для некоторых фреонов и больше нуля, наклон кривой сухости;
- меньшее расширение по мере прохождения через турбину.

Недостатки фреонов:

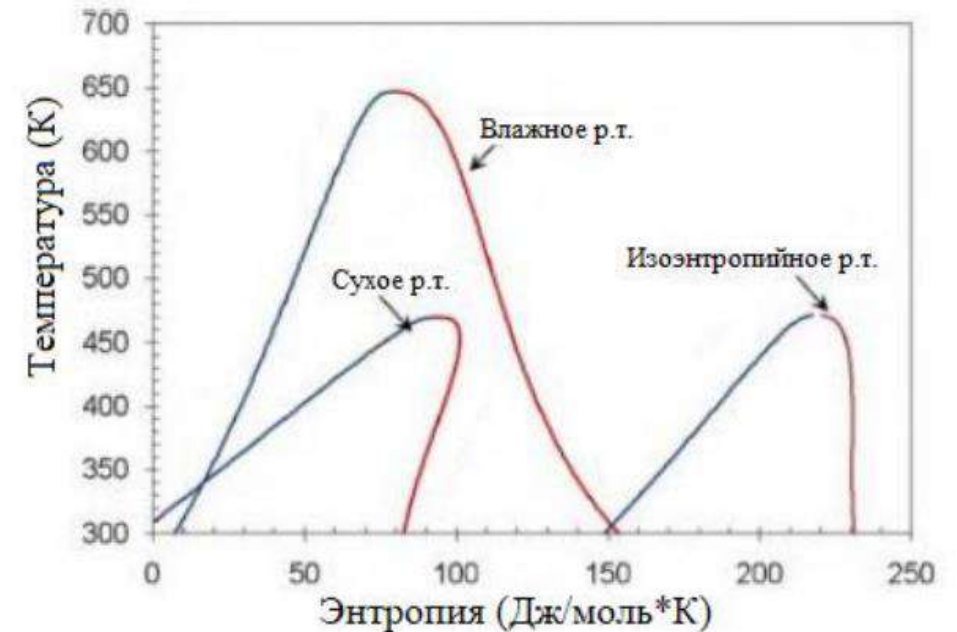
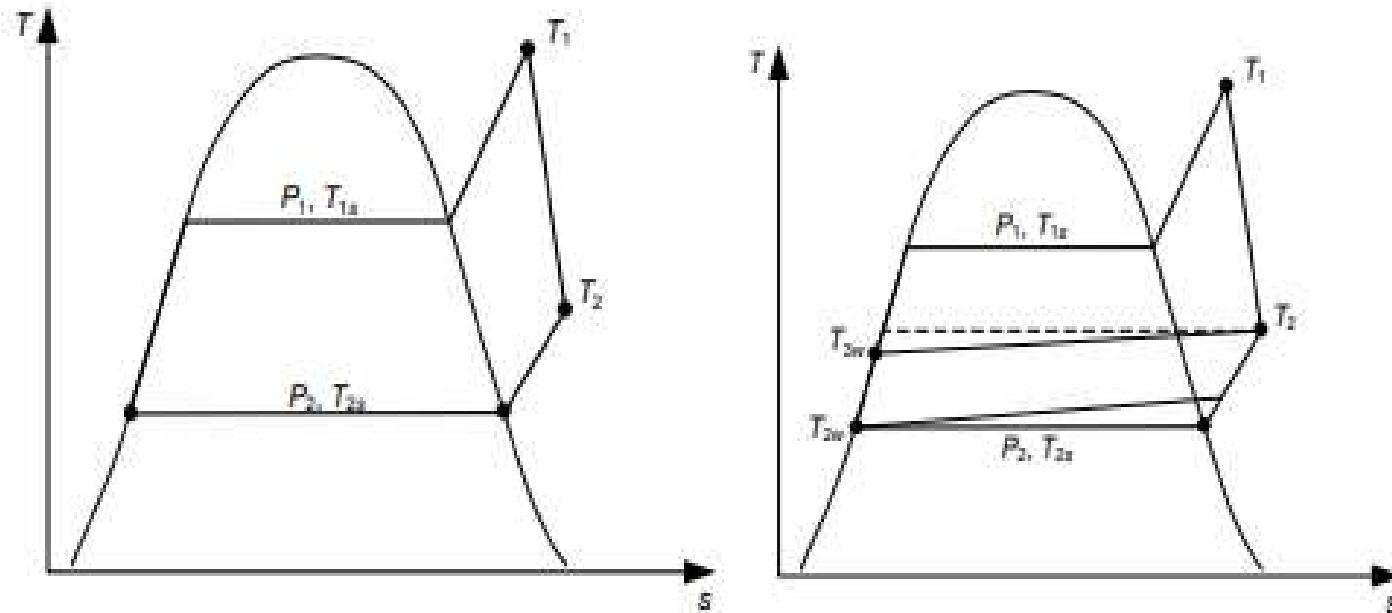
- маленькие теплоперепады;
- влияние на окружающую среду
- неустойчивость химических соединений при температурах выше 400-600°C;

Схема водо-фреонового цикла:



Альтернативные рабочие тела и циклы: Органический цикл Ренкина

Ниже приведен рисунок, на котором изображены две схемы ОЦР: с регенерацией и без. В зависимости от наклона линии пара на T-S диаграмме, рабочие тела можно разделить на три группы: сухие, влажные и изоэнтропийные. Применение сухого рабочего приводит к увеличению эффективности ПТУ и улучшению цикла с помощью добавления в схему регенератора.



Габариты турбины при использовании НКРТ

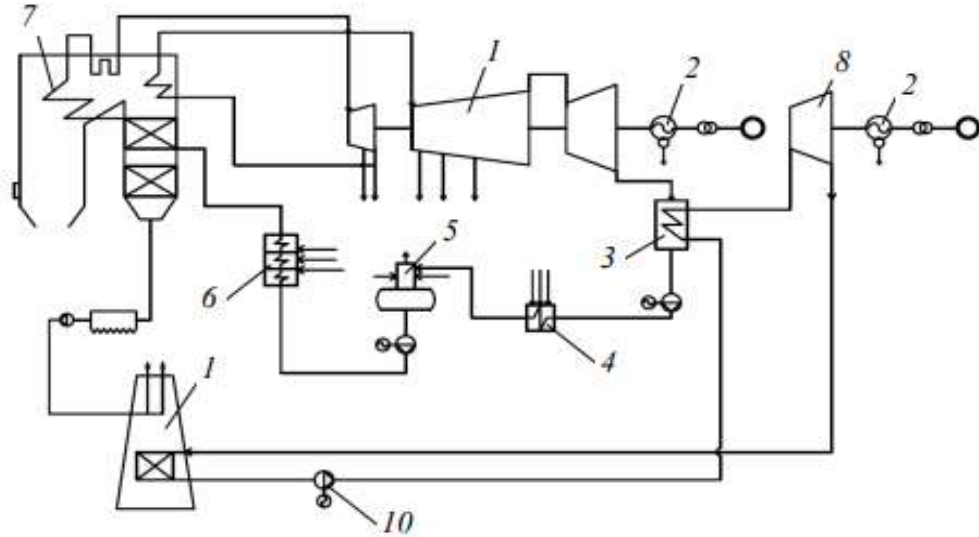
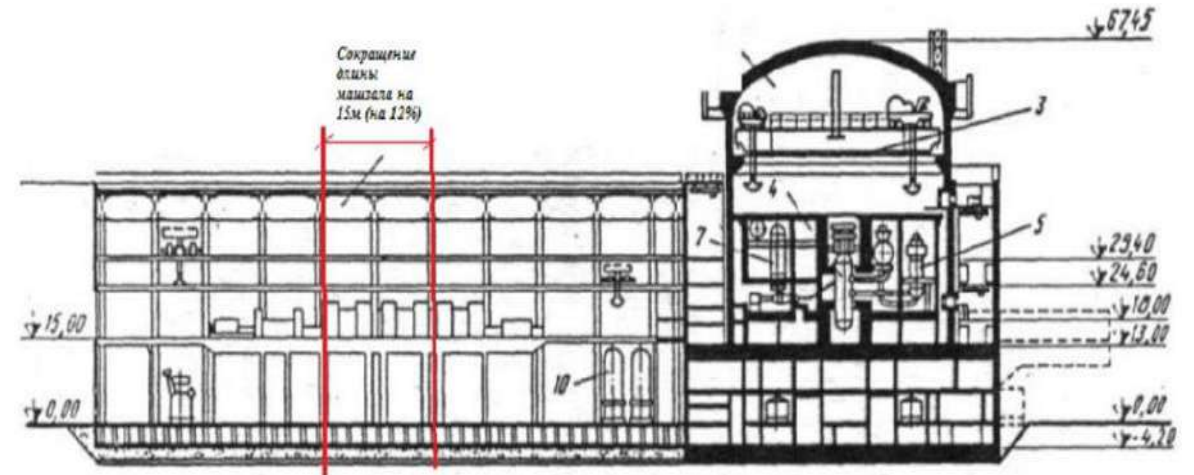


Схема представляет из себя надстройку конденсационного пароводяного энергоблока контуром на фреоне. Вместо конденсатора установлен испаритель. Отработавший пар из турбины конденсируется в испарителе, нагревая фреон и образуя его пар с высокими параметрами.

Имеются расчетные оценки, согласно которым применение низкикипящей надстройки на АЭС с РУ БН-800 позволяет существенно массу и габариты ПТУ, габариты машинного зала (на 15м или 12%) при сохранении приемлемого КПД.



Альтернативные рабочие тела и циклы: цикл Брайтона на $s\text{CO}_2$

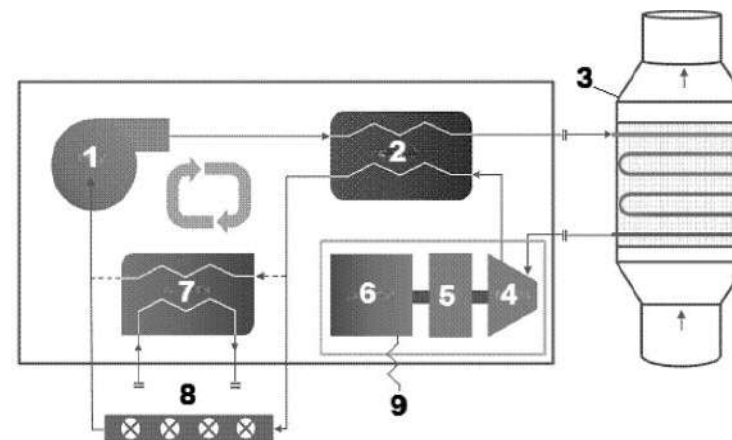
Достоинства:

- хорошая химическая стабильность;
- $s\text{CO}_2$ не имеет фазовых переходов;
- $s\text{CO}_2$ обладает высокой плотностью;
- отсутствие токсичности и горючести;
- высокая плотность в рабочем диапазоне температур, отсюда компактность оборудования
- КПД выше цикла Ренкина при температурах выше 400С

Недостатки:

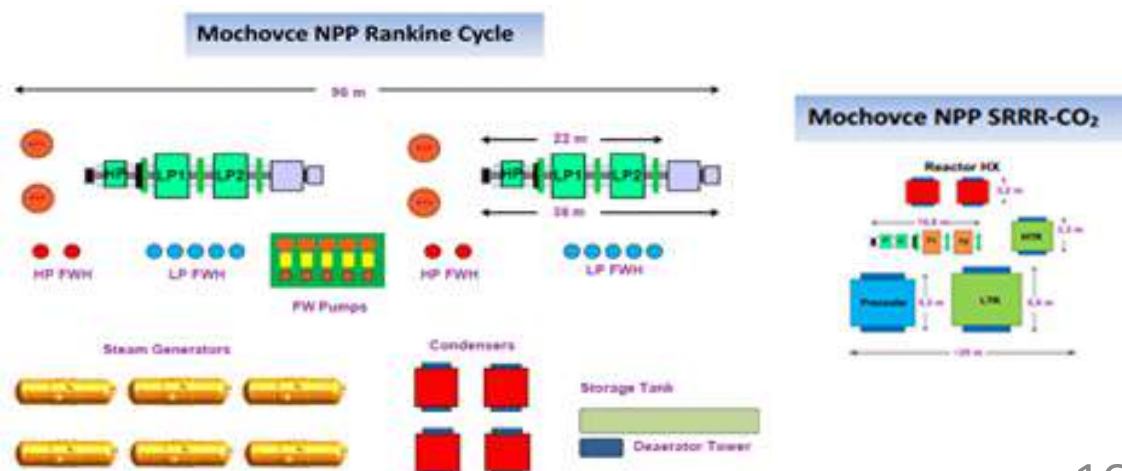
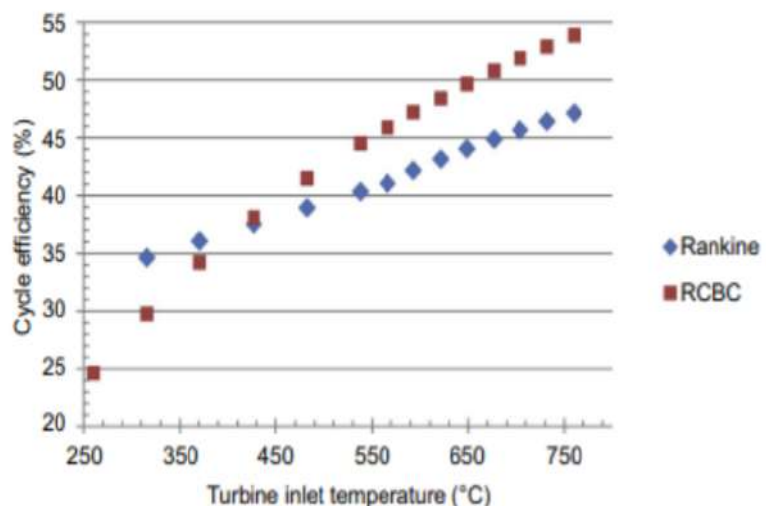
- нужно высокое рабочее давление;
- имеет большую чувствительность к примесям;
- прочностные требования к материалам;

Принципиальная схема работы электростанции на сверхкритическом диоксиде



Сравнение габаритов оборудования цикла Ренкина и SCO_2 -цикла Брайтона (АЭС «Моховце», Словакия, ВВЭР-440)

КПД цикла Ренкина на SCO_2 -цикла Брайтона



Сравнение альтернативных тепловых циклов и рабочих тел

	Цикл Ренкина на воде	Цикл Ренкина на НКРТ	Бинарный цикл	Цикл Брайтона на sCO ₂
Достоинства	<ul style="list-style-type: none"> Освоенность технологии Приемлемый КПД 	<ul style="list-style-type: none"> Гибкость выбора Компактность турбины Возможность использования при температурах ниже нуля 	<ul style="list-style-type: none"> Применение в широком диапазоне температур Высокий КПД 	<ul style="list-style-type: none"> Высокие рабочие температуры Высокий термодинамический КПД Компактность турбины
Недостатки	<ul style="list-style-type: none"> Большие габариты и сложность ПТУ Коррозионная активность Расширение во влажной зоне диаграммы 	<ul style="list-style-type: none"> Относительно низкие рабочие температуры для фреонов (R-134a до 170°C) Высокая стоимость Токсичность и воспламеняемость некоторых НКРТ Химическое разложение при высоких температурах 	<ul style="list-style-type: none"> Более сложная тепловая схема ПТУ 	<ul style="list-style-type: none"> Неосвоенность технологии Коррозия в присутствии паров воды Использование специальных конструкционных материалов

Выводы

- 1) Расчетom подтверждена возможность создания ПГ САЭ-ТА на $s\text{CO}_2$ со следующими основными характеристиками: площадь т/о поверхности, м^2 – 1924, масса ПГ, т – 28,779, цена ПГ, млн. руб (цены 2025г.) – 38,7.
- 2) В сравнении с ПГ САЭ-ТА на воде идея использования $s\text{CO}_2$ не оправдалась, так как вышли большие габариты и масса. Однако о применимости данного рабочего тела нужно судить по общей картине, учитывая турбину и затраты на сам тепловой аккумулятор.
- 3) На данный момент самый распространенный цикл – цикл Ренкина с водой в качестве РТ, который обладает рядом недостатков и может быть улучшен или же заменен.
- 4) Применение низкокипящих тел в различных циклах (бинарный, органический цикл Ренкина, Брайтона) для паротурбинных установок в ряде случаев способно повысить КПД турбин, сократить массо-габаритные характеристики ПТУ, однако (в случае бинарных циклов) существенно усложняет турбоустановку и тепловую схему АЭС;
- 5) НКРТ относятся к «сухим» рабочим телам, что позволяет существенно упростить конструкцию турбоустановки (не нужны промежуточные сепарация и перегрев, исключен эрозионный капельный износ); Фреоны позволяют сделать тепловые машины более компактными, дешёвыми, простыми и потенциально необслуживаемыми; К недостаткам фреонов относится их относительно низкая термостойкость, до 250°C), что затрудняет их использования при достаточно высоких начальных температурах циклов, в т.ч. при начальных параметрах установок ВВЭР и более высоких;
- 6) Перспективным НКРТ является сверхкритический CO_2 , который позволяет использовать термодинамические циклы при высоких начальных параметрах с высоким КПД и очень компактным оборудованием.

Спасибо за внимание!

ПРИМЕРЫ ЧЕРТЕЖЕЙ
выпускных квалификационных работ



НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ



Парогенератор РУ ВВЭР-С в двухпетлевой компоновке

СТУДЕНТ: **ОРЕЛЯНА УРСУА Е.И.**

Орельяна

ГРУППА: **ТФ-11-21**

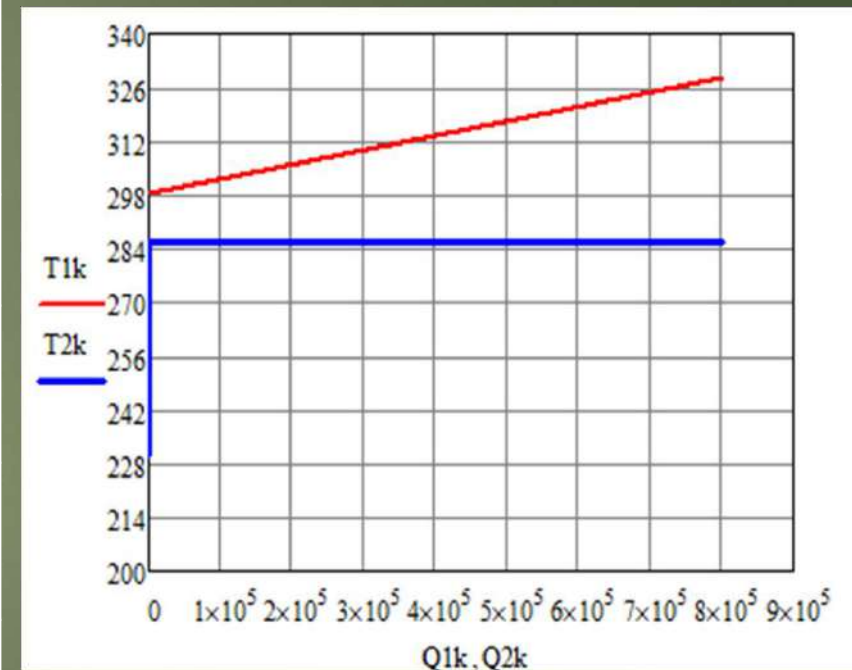
НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ: **КАВЕРЗНЕВ М.М.**

М.М. Каверзнев

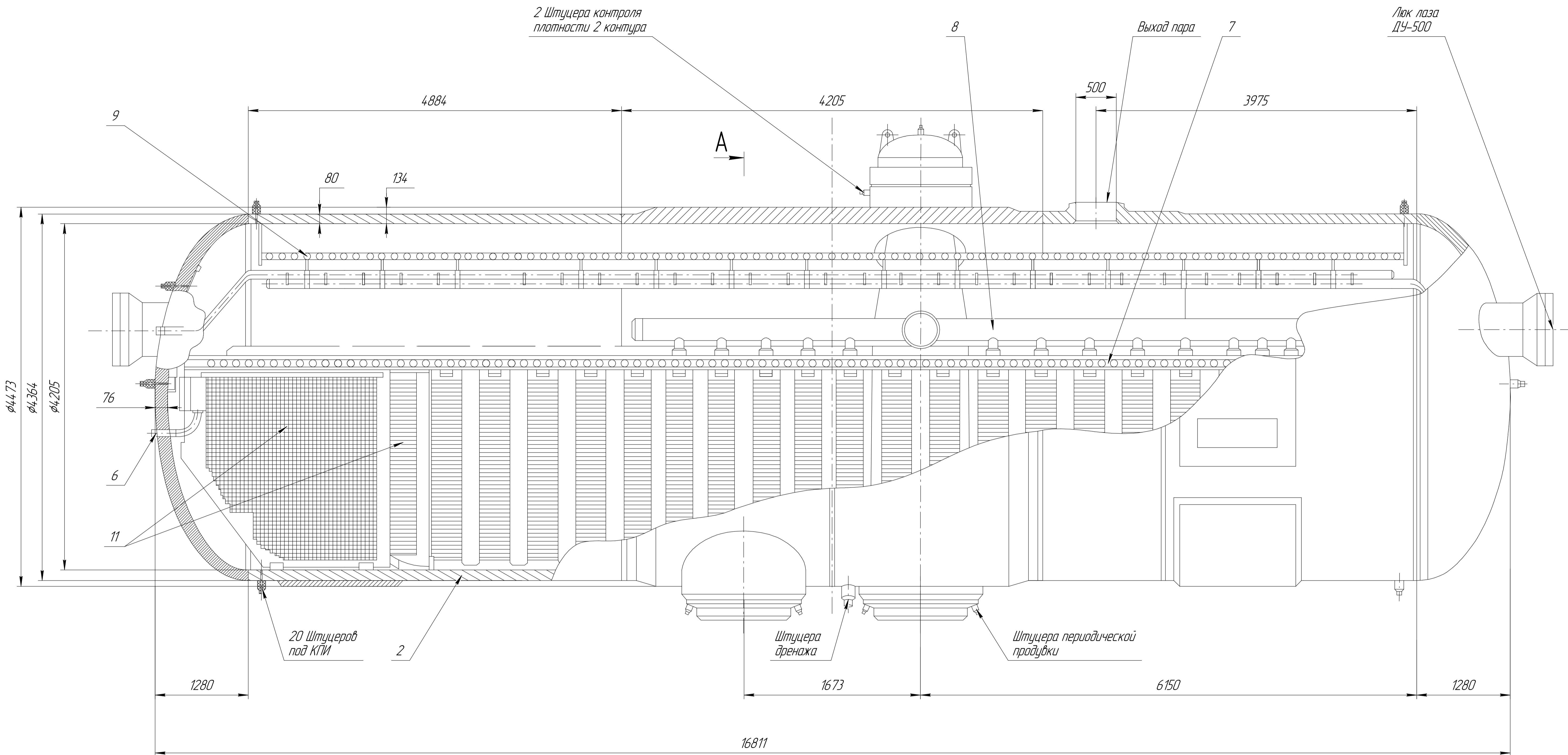
Москва, 2025

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ РАСЧЕТА

Наименование	Обозначение	Размерность	Значение
Тепловая мощность парогенератора	$Q_{\text{пг}}$	МВт	800
Давление теплоносителя	P_1	МПа	16.2
Давление рабочего тела	P_2	МПа	7
Температура теплоносителя на выходе	$t_{1\text{вых}}$	$^{\circ}\text{C}$	328.6
Температура теплоносителя на входе	$t_{1\text{вх}}$	$^{\circ}\text{C}$	298.2
Температура питательной воды	$t_{\text{пв}}$	$^{\circ}\text{C}$	230
Температура пара на выходе из ПГ	$t_{\text{пп}}$	$^{\circ}\text{C}$	285.8



T-Q диаграмма



N	Наименование параметра	Значение	Величина
1	Давление теплоносителя	16.2	МПа
2	Температура теплоносителя		
2а	на входе	328.6	°C
2б	на выходе	298.2	°C
3	Расход теплоносителя	4560.5	кг/с
4	Паропроизводительность	448.6	кг/с
5	Давление пара	7	МПа
6	Температура питательной воды	230	°C
7	Тепловая мощность	800	МВт

				МФТ.065112.001			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Лит.	Масса	Масштаб
					у	287500	1:25
Разработчик				ИТАЭ каф. АЭС			
Проектировщик				ТФ-11-21			
Технический контроль				ИТАЭ каф. АЭС			
Исполнитель				Формат А1			
Утв.				Копировал			

КОМПАС-3D V21 Учетная версия © 2024. ООО «ИТЭ» - Системы проектирования. Россия. Все права защищены.
 Имя: И.И. Иванов. Дата: 15.05.2024. Взам. инв. №: 1. Инв. № докум.: 1. Подп. и дата: 15.05.2024.

Пред. примен. Справ. №



НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ



Расчет ПГ системы аварийного энергоснабжения на тепловых аккумуляторах на НКРТ

Студент: **Поленок Е.А.**

Группа: **ТФ-12-21**

Научный руководитель: **Каверзнев М.М.**

Москва, 2025

Системы аварийного энергоснабжения энергоблоков АЭС САЭ ВВЭР-1000

В качестве автономных источников электропитания на АЭС выступают резервные дизельные электростанции (РДС), обеспечивающие генерацию энергии в случае нарушения штатного энергоснабжения вспомогательных систем ядерных энергоблоков.

Для энергоблоков ВВЭР-1000 в качестве аварийного электроснабжения предусмотрены источники автономного электроснабжения: автоматизированные РДС и агрегат бесперебойного питания на основе аккумуляторных батарей (по 3 на каждый энергоблок).

Достоинства:

- освоенная технология.

Недостатки:

- имеется риск незапуска;
- перерыв в питании ~15 секунд (время развертки), полная мощность развивается за 45 секунд;
- неиспользуемая в нормальной эксплуатации система, что вызывает простой оборудования.

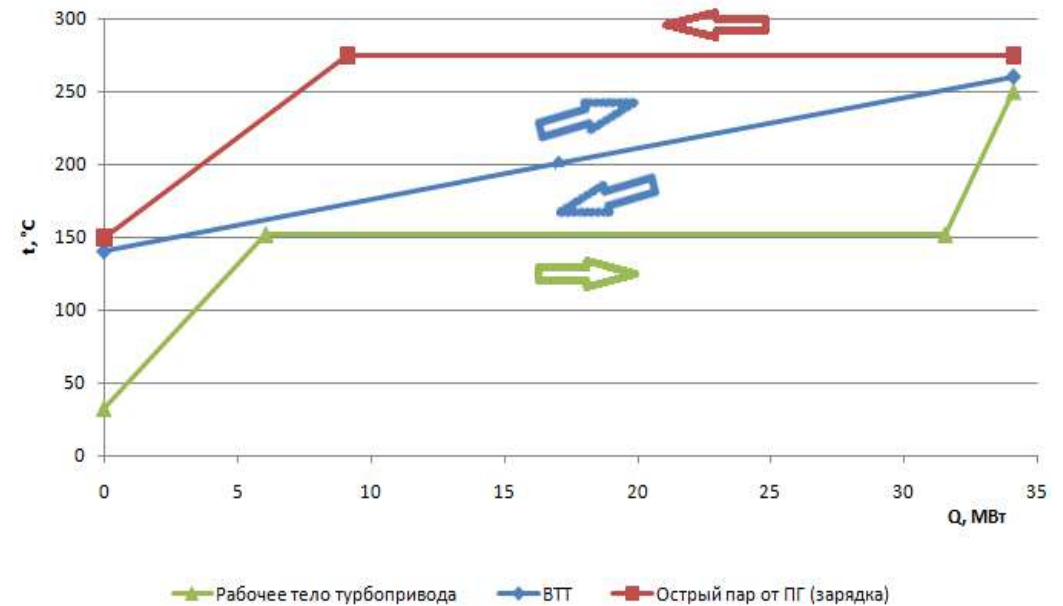
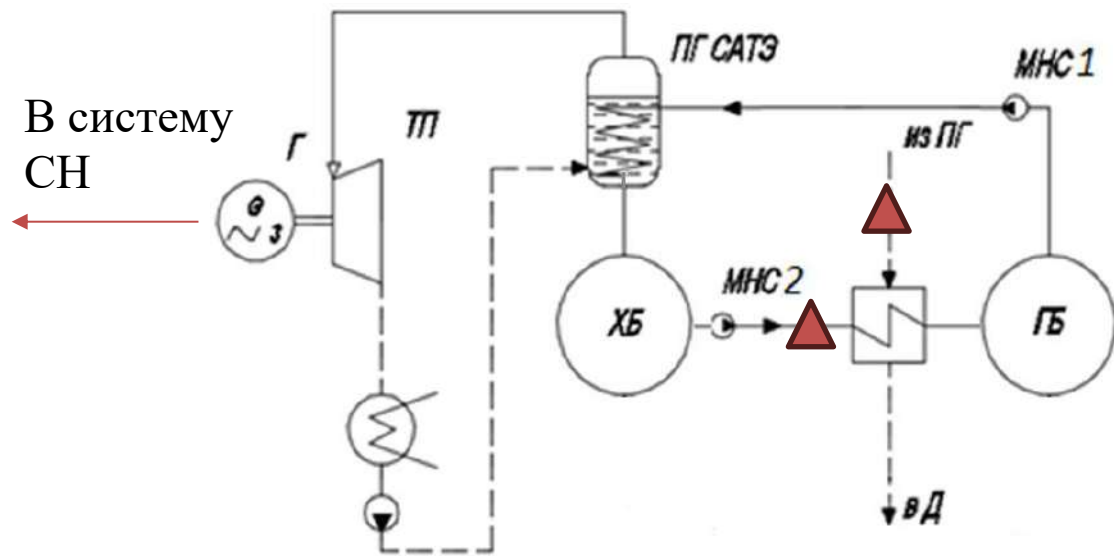


Альтернатива штатной САЭ:

Система аварийного энергоснабжения на тепловых аккумуляторах (САЭ-ТА)

В качестве одной альтернатив РДС рассматривается система аварийного энергоснабжения на тепловых аккумуляторах.

Схема обеспечивает непрерывную подзарядку ТАК и продолжение функционирования в случае обесточивания, прекращения подачи пара от ПГ, без переключений.



▲ – отключается при полном обесточивании

Процесс теплообмена между греющим паром, ВТТ и рабочим теплом ТП

Варианты конструктивных схем ПГ САЭ-ТА

При рассмотрении ПГ на воде возникала проблема в виде большой разницы плотностей пара и воды (~500 раз) при низких давлениях (~0,5МПа), что потребовало разделения ПГ на 2 корпуса с разным числом труб разной длины. Вариант колокольчик был отвергнут из-за сильной разницы длин частей, на смену ему пришла катушка.

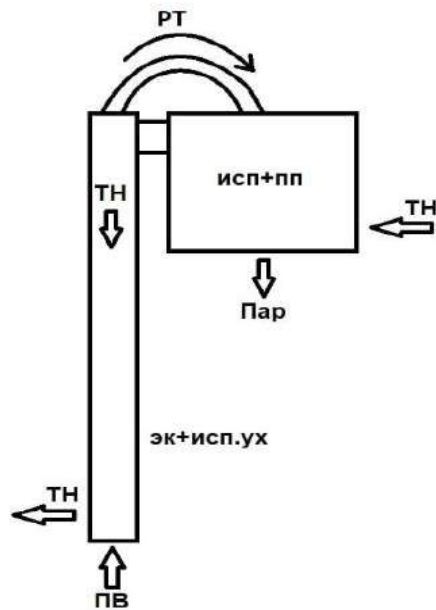


Схема
«Колокольчик»

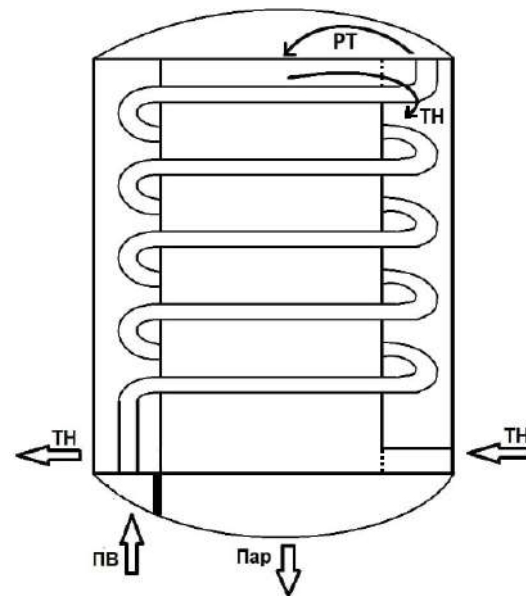


Схема
«Катушка»

Одной из причин выбора в качестве рабочего тела диоксида углерода в данной работе послужило то, что он не имеет фазовых переходов в сверхкритическом состоянии и имеет относительно малое изменение плотности.

Это позволяет создать конструкцию ПГ с простым трубным пучком, без деления на части и усложнения конструкции.

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

«МЭИ»

Кафедра АЭС

Выпускная квалификационная работа

Расчет модуля ПГ для РУ «Шельф-М»

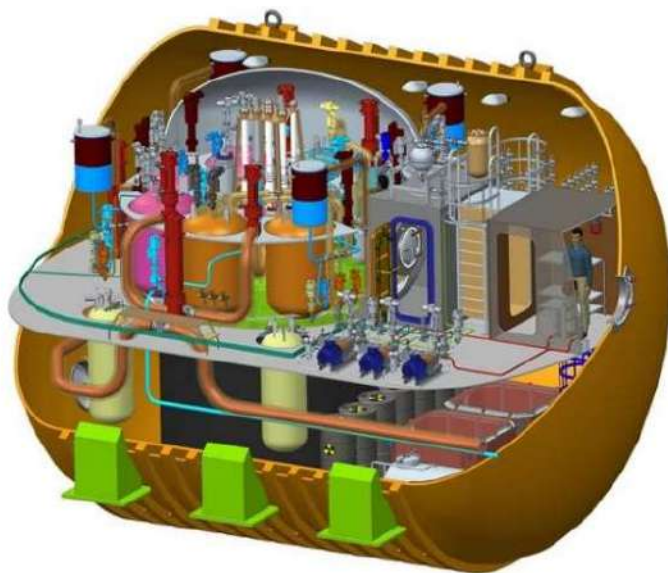
Студент: Черкасов В.А.

Группа: ТФ-11-21

Научный руководитель: Каверзнев М.М.

Москва, 2025 г.

Описание РУ «Шельф-М»



РУ «Шельф-М» — инновационная реакторная установка, созданная специалистами научно-исследовательского центра АО «НИКИЭТ». На её базе проектируются атомные станции малой мощности (АСММ) наземного размещения для энергоснабжения отдалённых регионов РФ.

Особенности:

- Интегральная компоновка
- Компактность энергоблока (11 м в длину, 8 м в диаметре)

Рисунок 1 – Модель РУ «Шельф-М»

Анализ параметров РУ «Шельф-М»



	РУ РИТМ-200	РУ "Шельф-М"
Тепловая мощность, МВт	175	35
Высота АЗ, мм	1200	702
Диаметр АЗ, мм	1600	936
Объём АЗ, м ³	2,565	0,483
Наружный диаметр опускной шахты, мм	2160	1266
Внутренний диаметр стенки корпуса, мм	3300	1682

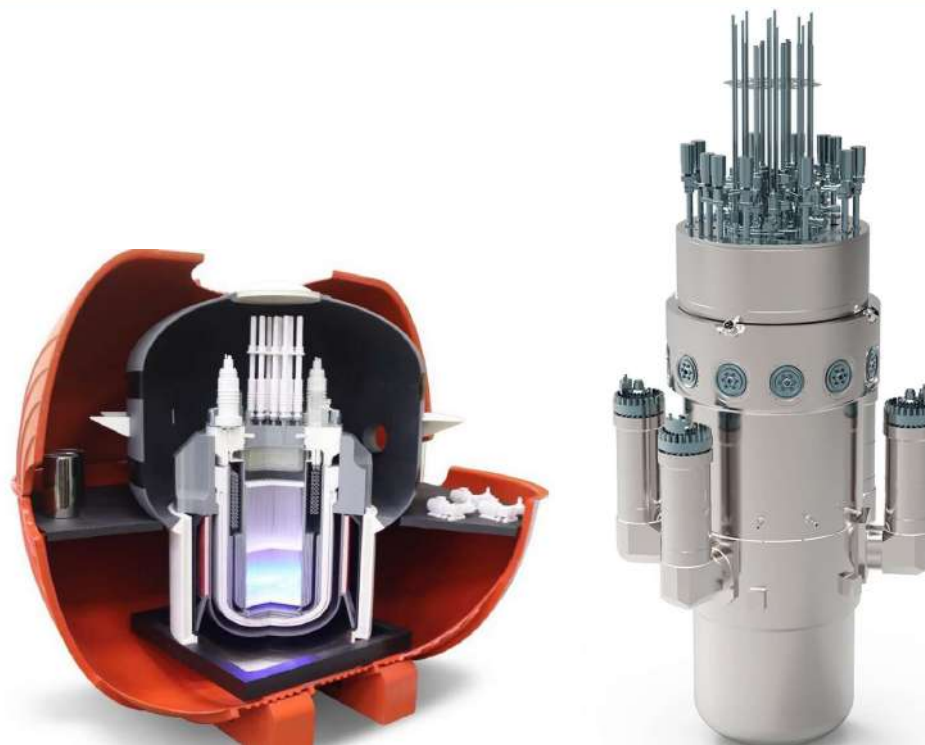


Рисунок 2 – РУ «Шельф-М» относительно РУ РИТМ-200

Анализ параметров РУ «Шельф-М»



Проектные параметры:

- Количество модулей ПГ → 12;
- Подвод ПВ/отвод пара → в верхней части модуля;
- Расположение модуля → в кольцевом зазоре между наружной стенкой опускной шахты и внутренней стенкой корпуса РУ;
- Высота пучка ТОТ → 2000 мм;
- Материал модуля ПГ → титановый сплав ПТ-7М

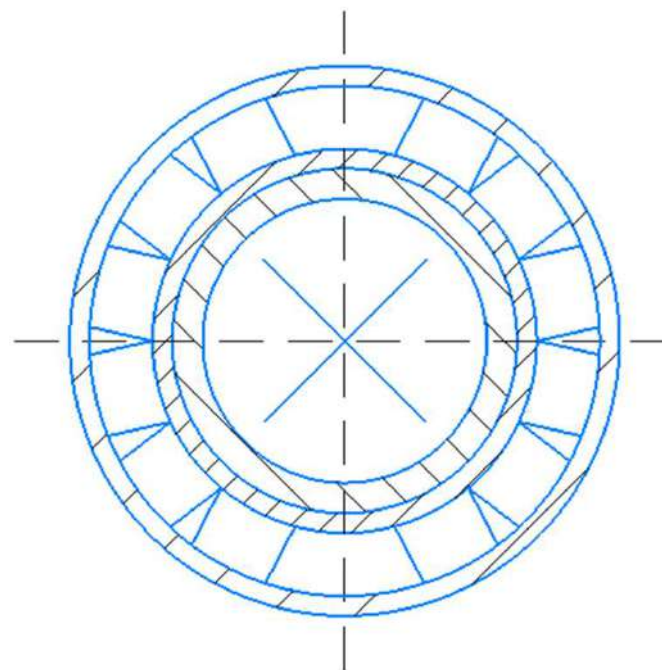


Рисунок 3 – Расположение модулей ПГ в РУ «Шельф-М»

Перв. примен.		Справ. №		Формат	Зона	Поз.	Обозначение	Наименование	Кол.	Примечание
Подп. и дата	Инд. № докл.	Взам. инв. №	Инд. № инв.							
								<u>Документация</u>		
								Чертеж общего вида		
								Спецификация		
								<u>Детали</u>		
						1		Верхняя часть	1	
								раздающего коллектора		
						2		Нижняя часть	1	
								раздающего коллектора		
						3		Верхняя часть	1	
								собирающего коллектора		
						4		Нижняя часть	1	
								собирающего коллектора		
						5		Ограждающий кожух	1	
						6		Вытеснитель	1	
						7		Опускная часть	1	
								трудного пучка		
						8		Подъемная часть	1	
								трудного пучка		
						9		Патрубок подачи ПВ	1	
						10		Торцевая заглушка	4	
						11		Патрубок отвода пара	6	
						12		Штуцер воздушника	2	

МИФ Т.062524.001 В0

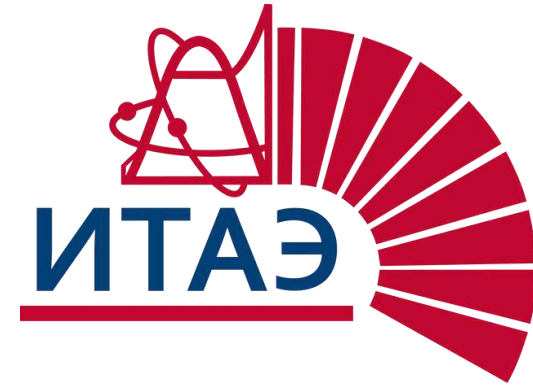
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Разраб.		Черкасов В.А.		
Пров.		Каверзнев М.М.		
Н.контр.				
Утв.				

Модуль ПГ для
РУ "Шельф-М"

Лит.	Лист	Листов
ч		1
ИТАЭ каф. АЭС ТФ-11-21		



Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский университет «МЭИ»



Усовершенствованный вертикальный ПГ для энергоблока ВВЭР-С в двухпетлевой компоновке

Студент: Сачков Д.А.

Группа: ТФ-11-21

Научный руководитель: Каверзнев М.М.

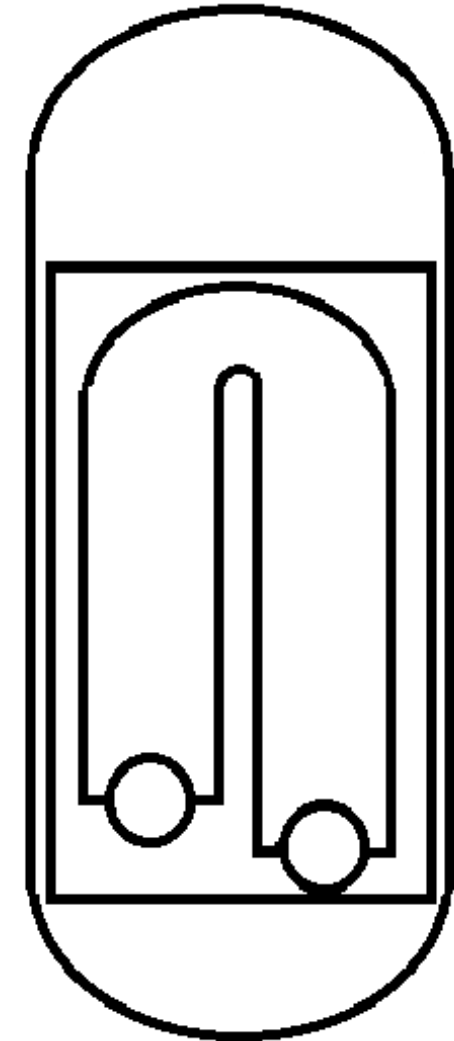
Дата: 02.07.2025

Исходные данные для расчета

Характеристика	Значение
Тепловая мощность парогенератора, МВт	800
Температура теплоносителя на входе/выходе, $t_{1ВХ}/t_{1ВЫХ}$, °С	328,6/298,2
Температура питательной воды, °С	230
Температура пара, °С	285,8
Давление теплоносителя, МПа	16,2

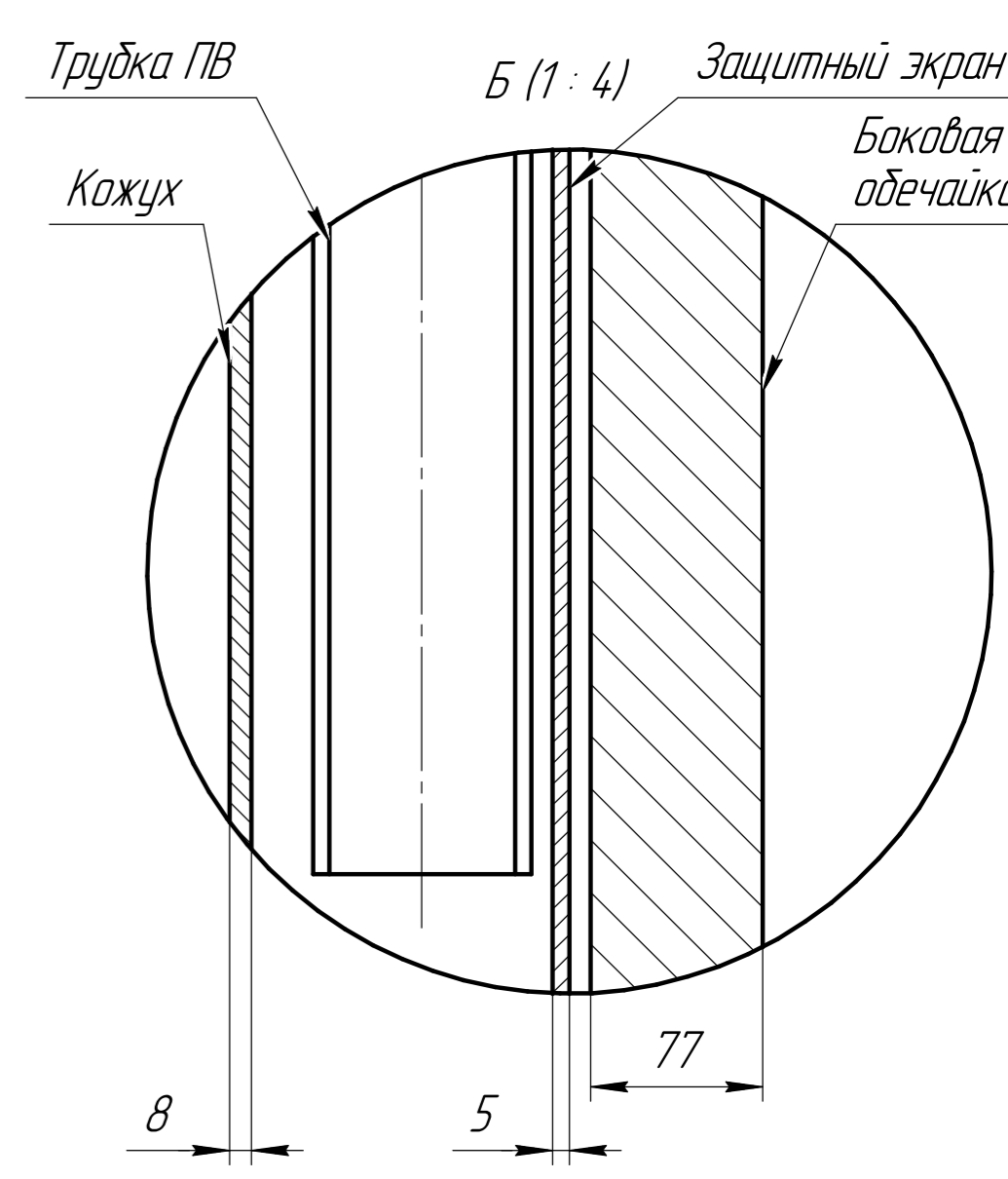
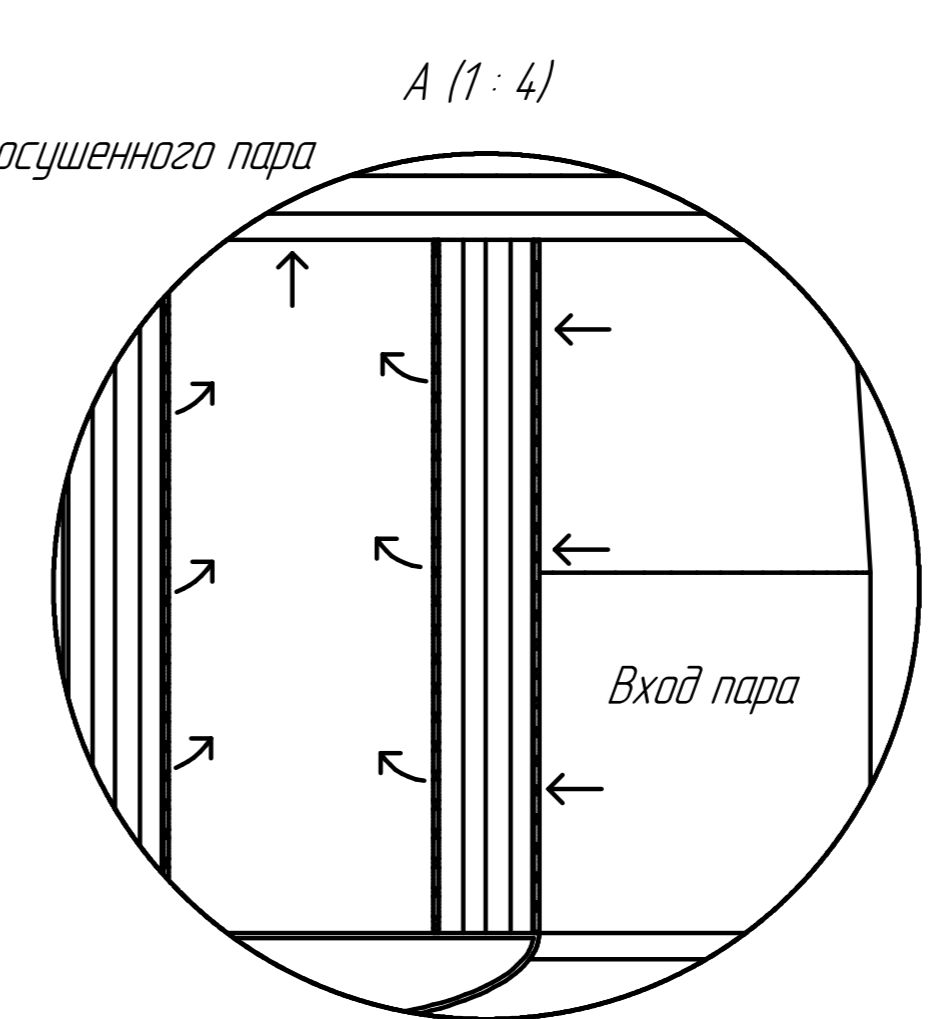
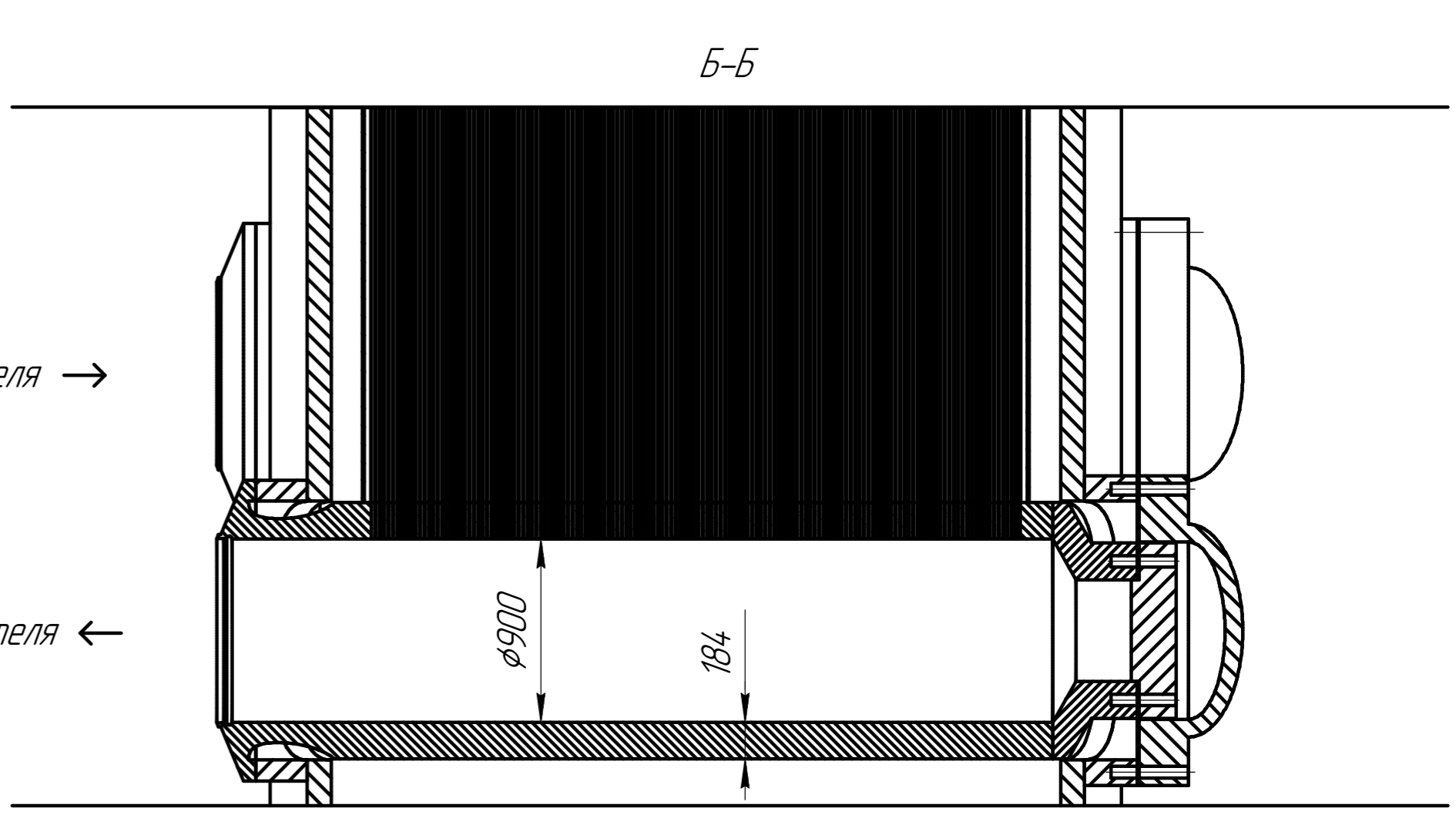
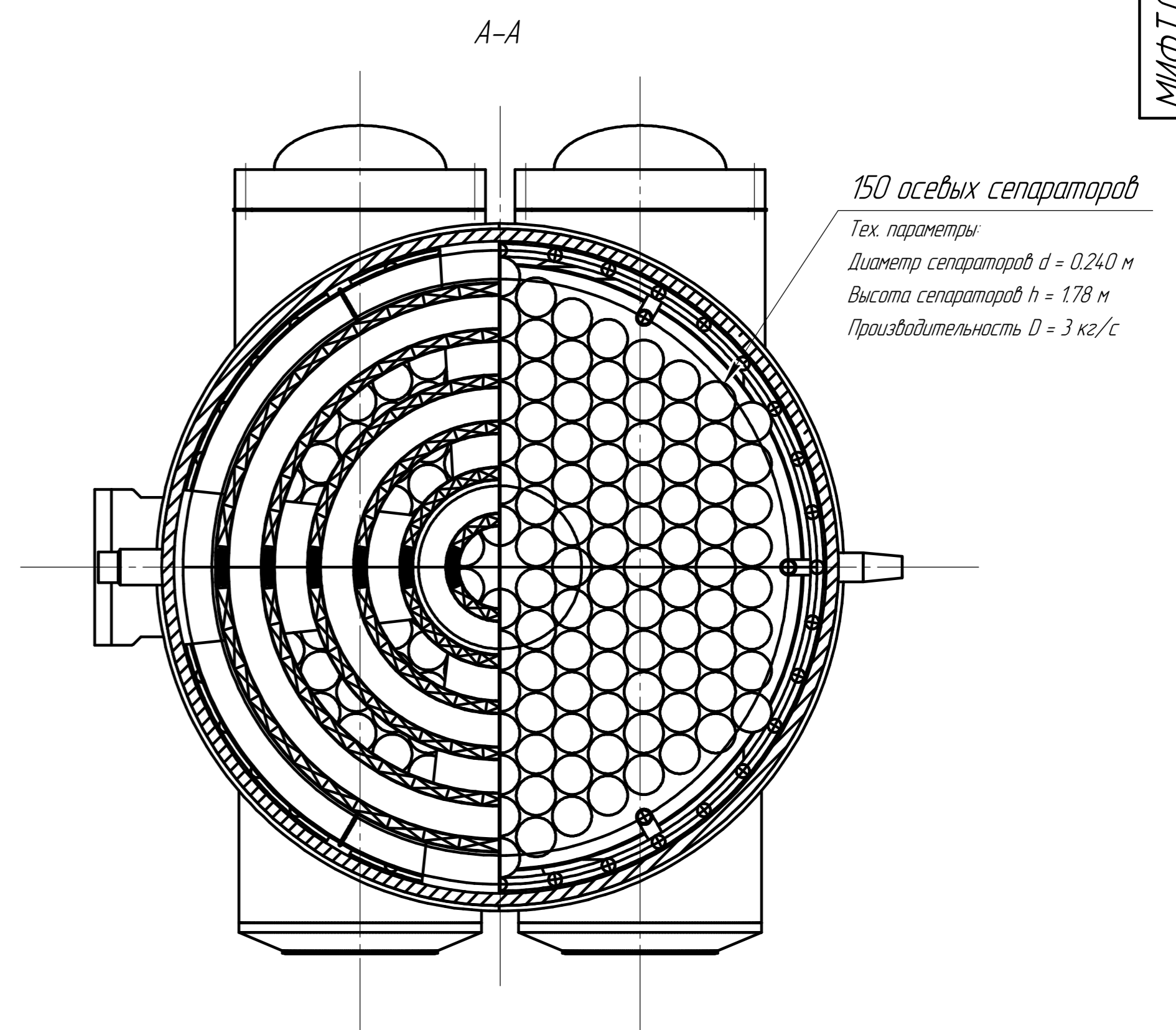
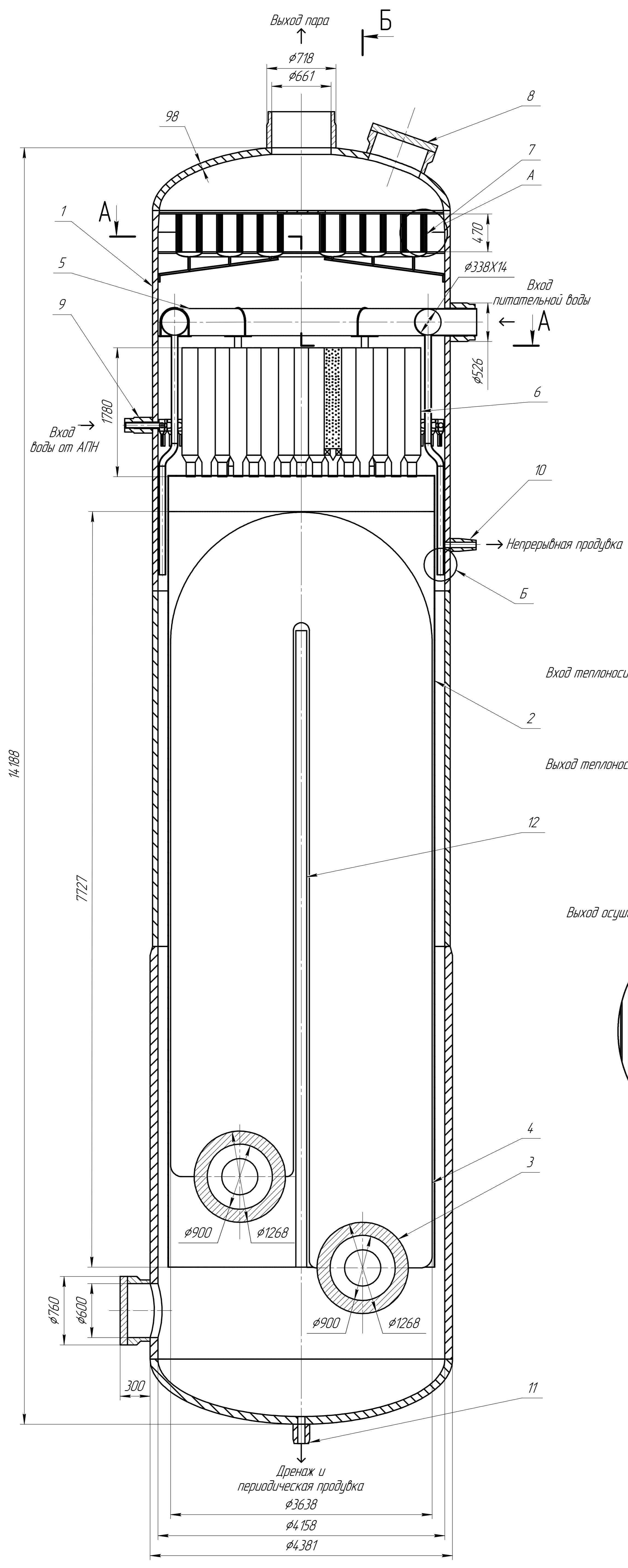
Выбор конструкционных материалов

Деталь	Марка стали
Корпусные детали	10ГН2МФА
Трубы ТПП	12Х18Н10Т
Коллектора теплоносителя	10ГН2МФА



Конструктивная схема ПГ

Выбор конструкционной схемы ПГ сочетает достоинства горизонтальных и вертикальных парогенераторов, а также используются узлы и детали ПГВ.



№	Наименование величин	Размерность	Значение
1	Расход теплоносителя	кг/с	4514
2	Температура теплоносителя		
2а	на входе	°С	328.6
2б	на выходе	°С	298.2
3	Давление теплоносителя	МПа	16.2
4	Расход рабочего тела	кг/с	4516.12
5	Температура рабочего тела		
5а	на входе	°С	230
5б	на выходе	°С	285.8
6	Давление пара	МПа	7

МИФТ.065012.001 СБ.

Усовершенствованный вертикальный парогенератор для энергоблока с реактором ВВЭР-С в двухтрубной компоновке

Изм./Лист	№ док.м.	Подп.	Дата	Лист	Масса	Масштаб
Разраб.	Сачков Д.А.				235210	1:20
Проб.	Кабризов М.М.			Лист	Листов	1
Т.контр.				ИТАЭ кафедра АЭС		
И.контр.				гр. ТФ-11-21		
Чтб.				Формат А1		

Копировал

Не для коммерческого использования

КОМПАС-3D v22 Учебная версия © 2023 ООО "АСКОН-Системы проектирования", Россия. Все права защищены.

Перв. примен.		Формат	Зона	Поз.	Обозначение	Наименование	Кол.	Примечание
Справ. №		A1				<u>Документация</u>		
						<u>Сборочный чертеж</u>		
						<u>Детали</u>		
				1		Корпус	1	
				2		Кожух	1	
				3		Коллектор	2	
				4		Трубный пучок	1	
				5		Труба раздачи ПВ	1	
				6		Осевой сепаратор	150	
				7		Вертикальный жалюзийный сепаратор	1	
				8		Люк-лаз	2	
				9		Штуцер аварийного подвода воды	1	
				10		Штуцер непрерывной продувки	1	
				11		Штуцер дренажа и периодической продувки	1	
				12		Вытеснитель	1	

МИФ Т.065012.001				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Разраб.		Сачков Д.А.		
Пров.		Каверзнев М.М.		
Н.контр.				
Утв.				
Усовершенствованный вертикальный парогенератор для энергоблока с реактором ВВЭР-С в двухпетлевой компоновке			Лит.	Лист
				Листов
				1
ИТАЭ кафедра АЭС гр. ТФ-11-21				

Продолжение следует!