

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Высшая школа атомной и тепловой энергетики

Работа допущена к защите

Руководитель ОП

_____ М.В. Конюшин

«___»_____2022 г.

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА СПЕЦИАЛИСТА

ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

ПРОЕКТ АЭС МОЩНОСТЬЮ 1200 МВт В ПРОВИНЦИИ КЫРКЛАРЕЛИ КЫЙЫКЕЙ, ТУРЦИЯ

по специальности 14.05.02 Атомные станции: проектирование, эксплуатация и
инжиниринг

по образовательной программе

14.05.02_01 Проектирование и эксплуатация атомных станций

Выполнил

студент гр.3251402/50101

Субашы Н.

Руководитель

Профессор ВШАиТЭ ИЭ, д.т.н.

Сергеев В.В.

Консультант

Старший преподаватель ВШАиТЭ ИЭ

Конюшин М.В.

по нормоконтролю

Доцент ВШАиТЭ ИЭ, к.т.н.

Катанаха Н.А.

Санкт-Петербург

2022

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ПЕТРА ВЕЛИКОГО
Высшая школа атомной и тепловой энергетики

УТВЕРЖДАЮ

Руководитель ОП

М.В. Конюшин

« » 2022 г.

ЗАДАНИЕ

по выполнению выпускной квалификационной работы
студенту Субашы Неджметтин, 3251402/60101

1. Тема работы: Проект АЭС мощностью 1200 МВт в провинции Кыйыкей, Турция
2. Срок сдачи студентом законченной работы: _____ г.
3. Исходные данные по работе: тип реактора: ВВЭР; тип парогенератора: вертикальный насыщенного пара; теплофикационная нагрузка: 250 Гкал/час; номинальная температура теплоносителя 1-го контура: 326 °С; расчетная температура охлаждающей воды: 15 °С; расчетная температура прямой сетевой воды: 130 °С
4. Содержание работы (перечень подлежащих разработке вопросов):
Введение;
Обоснование выбора площадки размещения АЭС;
Расчет тепловой схемы энергоблока АЭС;
Обоснование выбора ядерного реактора: теплогидравлический расчет;
Заключение;
Список использованных источников
5. Перечень графического материала (с указанием обязательных чертежей): отсутствует
6. Консультанты по работе: отсутствуют
7. Дата выдачи задания 25.11.2021 г.

Руководитель ВКР _____
(подпись)

Сергеев В.В.
инициалы, фамилия

Задание принял к исполнению 25.11.2021 г.
(дата)

Студент _____
(подпись)

Субашы Н.
инициалы, фамилия

РЕФЕРАТ

В работе 94 страницы, 12 рисунков, 30 таблиц.

Ключевые слова: РЕАКТОР ВВЭР-1200, ВВЭР, ГЕОМЕТРИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ, ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ, ТЕПЛОВАЯ СХЕМА, ЭНЕРГЕТИКА ТУРЦИИ.

Тема выпускной квалификационной работы: « Проект АЭС мощностью 1200 МВт в провинции Кыйыкёй, Турция ».

Выполнено проектирование атомной электростанции мощностью 1200 МВт с реакторами типа ВВЭР-1200. Осуществлено обоснование выбора площадки размещения АЭС, выполнен расчет тепловой схемы проектируемого энергоблока АЭС, проведены теплогидравлический расчет реактора.

В данной работе разработан водо-водяной корпусной энергетический ядерный реактора с водой под давлением. При разработке было выбрано место размещения АЭС, был разработан генеральный план АЭС. Правильный выбор места для строительства атомной электростанции обеспечит безопасную эксплуатацию станции, высокую экономическую эффективность, безопасность энергоснабжения и внесет вклад в защиту окружающей среды. Также был произведен расчет тепловой схемы энергоблока, целью которого было определение характеристик второго контура, КПД нетто станции. Также был произведен теплогидравлический расчет реактора, целью которого было определение геометрических характеристик реактора, а также основных параметров таких как расход теплоносителя, температура оболочки твэла, температура топлива. В ходе гидравлического расчета были вычислены потери давления теплоносителя на различных участках движения. На основе этих расчетов был выбран оптимальный вариант скорости движения теплоносителя.

ABSTRACT

In the work 94 pages, 12 figures, 30 tables.

Key Words: VVER-1200 REACTOR, VVER, GEOMETRIC CALCULATION, THERMAL-HYDRAULIC CALCULATION, THERMAL SCHEME, TURKEY ELECTRICITY.

The subject of the graduate qualification work is : "Project of a 1200 MW NPP in the province of Kıyıköy, Turkey".

The design of a nuclear power plant with a capacity of 1200 MW with VVER-1200 reactors was completed. The substantiation of the choice of the NPP location site was carried out, the thermal scheme of the designed power unit of the NPP was calculated, and the reactor was thermal-hydraulic calculated.

In this work, a pressurized water-cooled pressurized water-cooled power nuclear reactor has been developed. During the development, the location of the NPP was chosen, and the general plan of the NPP was developed. Choosing the right site for the construction of a nuclear power plant will ensure safe operation of the plant, high economic efficiency, security of energy supply and will contribute to environmental protection. Also, the thermal diagram of the power unit was calculated, the purpose of which was to determine the characteristics of the second circuit, the net efficiency of the station. A thermohydraulic calculation of the reactor was also carried out, the purpose of which was to determine the geometric characteristics of the reactor, as well as basic parameters such as coolant flow rate, fuel element cladding temperature, fuel temperature. During the hydraulic calculation, the pressure loss of the coolant in various sections of the movement was calculated. Based on these calculations, the optimal variant of the coolant velocity was chosen.

СОДЕРЖАНИЕ

СПИСОК ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ.....	7
ВВЕДЕНИЕ	8
ГЛАВА 1. ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ПЛОЩАДКИ РАЗМЕЩЕНИЯ АЭС	11
1.1. Стандарты строительства атомной электростанции	11
1.2. Географическое положение провинции Кырklarели	13
1.3. Климатические условия	14
1.4. Транспортная инфраструктура и электросеть провинции Кырklarели.....	14
1.5. Выбор площадки строительства АЭС	16
ГЛАВА 2. РАСЧЕТ ТЕПЛОВОЙ СХЕМЫ ЭНЕРГОБЛОКА АЭС.....	18
2.1. Выбор основные технологические параметров контура рабочего тела.....	18
2.2. Определение необходимого числа регенеративных подогревателей и давлений пара в отборах турбин.....	23
2.3. Распределение температуры по конденсатному тракту:	26
2.4. Определение параметров отборов	27
2.5. Расчет процесса расширения пара в проточной части турбины	28
2.6. Расчет подогревателей сетевой воды.....	33
2.7.Определение расходов среды по элементам схемы	40
2.8. Расчет мощности турбины.....	47
2.9. Расход электроэнергии на собственные нужды	47
2.10. Показатели тепловой экономичности.....	48
Вывод	50
ГЛАВА 3. ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА: ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ	51
3.1. Исходные данные	51
3.2. Расчет геометрических характеристик.....	52
3.3. Конструктивный расчет	54
3.4. Расчет неравномерности энерговыделения в АЗ.....	57
3.5. Гидравлическое профилирование	58
3.6. Основные теплогидравлические параметры АЗ.....	59

3.7. Распределение температуры теплоносителя по высоте ТВЭЛ.....	61
3.8. Распределение температур оболочки ТВЭЛ	67
3.9. Распределение температур топлива по высоте ТВЭЛ.....	76
3.10. Расчет гидравлических потерь	82
3.11. Выбор оптимального варианта.....	93
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	94
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	95



СПИСОК ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ

АЗ - активная зона

ТВС - тепловыделяющая сборка

ТВЭЛ - тепловыделяющий элемент

БЗТ - блок защитных труб

ГЦН - Главный циркуляционный насос

ПГ - Парогенератор

ЦВД - Цилиндр высокого давления

ЦНД - Цилиндр низкого давления

СПП - Сепаратор-пароперегреватель

К - Конденсатор

КН - Конденсатный насос

ДН - Дренажные насосы

Д - Деаэратор

ПН - Питательный насос

ТС - Точки смещения

Г - Генератор

БОУ - Обессоливающая установка

ОЭ - Охладитель эжекторов

РКУ - Регулирующий клапан

СРК - Система радиационного контроля

ПВД - подогреватели высокого давления

ПНД - Подогреватель низкого давления

ПСВ - Подогреватели сетевой воды

Р - Реактор

ОГ - Охладитель генератора

РПК – Регулирующий питательный клапан

ТП - Трубопривод

ЦН - Циркуляционный насос

ДК - Дроссельный клапан

ВВЕДЕНИЕ

Сегодня в 30 странах мира работают около 440 ядерных энергетических реакторов общей мощностью около 400 ГВт. В 2019 году они обеспечили 2657 ТВт·ч, что составляет более 10% мировой электроэнергии.

Ежегодно международное энергетическое агентство (МЭА) представляет текущую ситуацию, а также ссылки и другие сценарии, особенно сокращение выбросов углерода, в своем отчете «Перспективы развития мировой энергетики» (WEO). В версии 2020 года (WEO 2020) «Сценарий особой политики» МЭА показывает рост установленной ядерной мощности более чем на 15% в период с 2019 по 2040 год (около 480 ГВт). Первоначально номинальный проектный срок службы большинства атомных электростанций составлял от 25 до 40 лет, но инженерные оценки показали, что многие из них могут работать дольше. К концу 2016 года NRC продлила лицензии более чем на 85 реакторов, увеличив их срок эксплуатации с 40 до 60 лет. Такое продление лицензии примерно через 30 лет оправдывает значительные капитальные затраты, необходимые для замены изношенного оборудования и устаревших систем управления.

Для Турции исследования по строительству атомной электростанции основаны на следующих преимуществах [4]:

В-первых: диверсификация источников энергии, обеспечение энергетической безопасности, полное удовлетворение потребностей страны в электроэнергии, снижение зависимости от ископаемого топлива, особенно когда большинство потенциал гидроэнергетики и ископаемого топлива; обеспечить экономию при конкуренции с импортным топливом.

Во-вторых : способствовать смягчению последствий изменения климата, сокращать выбросы загрязняющих газов из ископаемого топлива и создавать потенциальные финансовые доходы за счет сокращения выбросов CO₂.

В-третьих : способствовать развитию научного, технического и технологического потенциала, развивать инфраструктуру не только в атомной энергетике, электроэнергетике, но и во многих других отраслях и секторах экономики.

В-четвертых : способствовать усилению позиций Турции при постепенном освоении технологий ядерной энергетики.

Объект исследования.

Объектом исследования данной работы является АЭС с ядерным реактором типа ВВЭР-1200.

Предмет исследования.

Предметами исследования данной работы являются место размещения АЭС, параметры принципиальной тепловой схемы и показатели тепловой экономичности энергоблока АЭС, теплогидравлические характеристики реактора.

Цель исследования

Обосновать возможность строительства АЭС-1200 МВт в провинции Кыйыкей, Турция. Для достижения поставленной цели выполняются:

Задачи работы

1. Выбора площадки размещения АЭС.
2. Расчеты тепловой схемы энергоблока АЭС.
3. Разработка генерального плана АЭС.
4. Теплогидравлический расчет ядерного реактора.

Теоретическая и методологическая база исследования.

При подготовке ВКР использованы материалы по таким учебным дисциплинам: «Методы расчета и конструирования парогенераторов АЭС», «Методы расчета и конструирования ядерных реакторов».

Практическая значимость важного подготовительного этапа к строительству атомной электростанции АЭС с реактором ВВЭР-1200 в Турции.

Информационная база

Информация официальных статистических публикаций государственной энергетической компании Турции Turkey Electricity (ET); библиотека Политехнического университета; а также знания, полученные в процессе обучения в вузе, в ходе прохождения учебной и производственных практик, во время прохождения преддипломной практики.

Практическая значимость

Практическая значимость данной работы заключается в разработке проекта АЭС с ядерным реактором типа ВВЭР-1200, обеспечивающего в будущем растущий спрос на электроэнергию в Турции.

ГЛАВА 1. ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ПЛОЩАДКИ РАЗМЕЩЕНИЯ АЭС

1.1. Стандарты строительства атомной электростанции

ЦЕЛЮЮ ДАННОГО ГЛАВЫ ЯВЛЯЕТСЯ ДЕТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА ВЫБОРА ПЛОЩАДКИ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА АТОМНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ (АЭС).

Атомные электростанции являются потенциально опасными объектами, поэтому к выбору площадки для строительства предъявляется ряд требований, которые должны обеспечивать радиационную безопасность, населения при нормальной эксплуатации и при возможных аварийных ситуациях.

При выборе площадки рассматриваются следующие аспекты:

- влияние на безопасность АС процессов, явлений, и факторов природного и техногенного происхождения;
- радиационное влияние АЭС на население и окружающую среду;
- характеристики района размещения (физические характеристики, топография, метеорология и гидрология) и окружающей среды (виды растительности и животный мир), которые могут оказать влияние на перенос и накопление радиоактивных продуктов. При этом должно быть учтено, что перенос радионуклидов к человеку может происходить по воздуху, воде и пищевым цепочкам;
- медико-демографические показатели и характеристики района размещения, которые могут повлиять на масштабы потенциального воздействия радиоактивных выбросов (использование земельных и водных ресурсов, распределение населения вокруг площадки, наличие у него эндемических, т.е.. специфичных для данной местности заболеваний и др.).

Согласно НП-032-01 - «Размещение атомных станций. Основные критерии и требования по размещению атомных станций» и СПАС-99 к размещению атомных электростанций предъявляются следующие основные требования:

- не допускается размещать АЭС в сейсмоопасных районах с интенсивностью МРЗ более 9 баллов по шкале MSK-64; в районах, где частота

появления ураганов, тайфунов менее 1 раза в 20 лет, на территории, в пределах которой нахождение АЭС запрещено природоохранным законодательством.

К району размещения АС и на площадке АС должны быть проведены обследования по выявлению источников потенциальной техногенной опасности с учетом удаления этих источников от АС. Допускается не учитывать источники техногенной опасности, вероятность возникновения аварий на которых менее 10^{-6} в год.

Источниками техногенной опасности являются объекты, характеризующиеся возможными авариями, вызывающими взрывы и пожары, выбросы взрывоопасных, воспламеняющихся, токсичных и коррозионно-активных веществ.

Должно быть проанализировано влияние на безопасность АС всех возможных стационарных и подвижных источников аварийных взрывов, расположенных на удалении до 5 км, складов боеприпасов — на удалении до 10 км от границы площадки АС.

Должно быть проанализировано влияние на безопасность АС всех возможных стационарных и подвижных источников аварийных выбросов химически активных веществ на удалении до 5 км от границы площадки АС.

Должны быть определены параметры воздействий на АС и вероятности их достижения при событиях, вызванных взрывами и пожарами, выбросами взрывоопасных, воспламеняющихся, токсичных и коррозионно-активных газов и веществ на промышленных объектах, наземном и водном транспорте;

- в радиусе 25 км от планируемой площадки (зона планирования мероприятий обязательной эвакуации) средняя плотность населения, рассчитанная на весь период эксплуатации АЭС, не должна превышать 100 человек/км²;

- должна быть предусмотрена возможность создания транспортных обеспечивающего не превышение установленных НРБ-99 доз облучения;

1.2. Географическое положение провинции Кыркларели

Кыркларели расположена на северо-западе Турции, во фракийской части региона Мармара. Если характеризовать географическое положение провинции, то можно сказать, что она находится где-то между 41 градусом 13 минутами, 34 секундами и 42 градусами 05 минутами 03 секундами, 26 градусами 54 минутами 14 секундами и 28 градусами 06 минутами 15 секундами восточной декады. На севере - Болгария; на востоке - Черное море; на юго-востоке и юге - Текирдаг (Сарай, Чорлу, Муратлы и Хайраболу); на западе - Эдирне, на юге и юго-западе - районы Узункепрю, Хавса и Лалапаша.

Территория Кыркларели окружена хребтами, которые с севера составляют границу с Болгарией, с востока - долину реки Ревзе, с востока - Черное море, с юга - главную долину реки Эргене и с запада - линию водного участка ручья Теке, впадающего в реку Эргене. Кыркларели занимает площадь 6650 км², высота центра провинции над морем - 203 метра.

Ее основные водоемы - река Эргене и ручей Ревзе. На территории провинции растет много лесов, что является ее отличительной чертой.

На рис.1.1 приведены карта Турции и географическое положение провинции Кыркларели.



Рис.1.1. Географическая карта Турции

1.3. Климатические условия

Город Кыркларели имеет умеренно теплый климат. Зимой в городе Кыркларели выпадает значительно больше осадков, чем летом. В течение года наблюдается небольшое количество осадков в городе Кыркларели. Климат здесь классифицируется как Csa системой Кеппен-Гейгера. В Кыркларели, средняя годовая температура составляет 13.5 °C. В год выпадает около 640 mm осадков

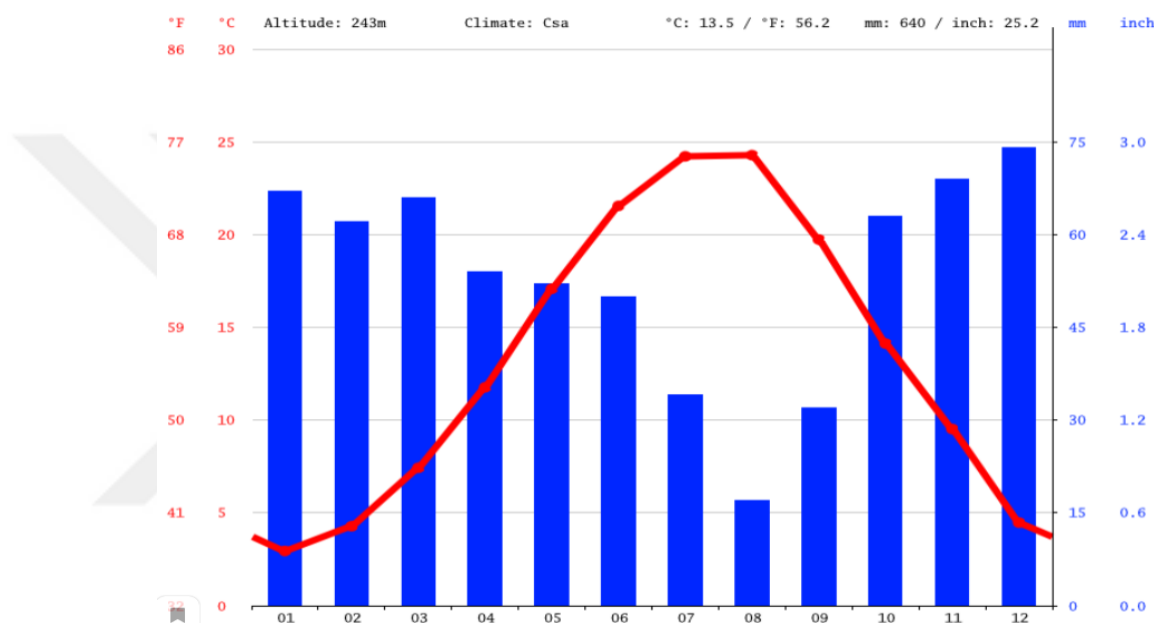


Рис.1. 2. Климатический график Кыркларели

Самый сухой месяц Август, с 17 mm осадков. Большая часть осадков выпадает в Декабрь, в среднем 74 mm

1.4. Транспортная инфраструктура и электросеть провинции Кыкларели

В границах провинции Кыркларели проходит 65 километров автомагистралей, 342 километра государственной дороги, 200 километров провинциальной дороги. Общая протяженность автодороги в провинции - 607 километров. Д-100 и шоссе Эдирне-Киналы составляют главные артерии. Дорога Д-100, соединяющая Стамбул и Эдирне, и автомагистраль ИЮЛ, соединяющая

Турцию с Европой, являются наиболее важными дорогами провинции. Через провинцию проходит 79 километров автодороги Д-100 и 65 километров автодороги ИЮЛ. На этой оси расположены районные центры Бабаески и Люлебургаз, а на севере - провинциальный центр.

Октябре Черкезкей-Виза-Пинархисар-Кыркларели и Эдирне соединяются с другой осью в провинции, отделенной от Силиври.

Есть две транспортные оси, связанные с севера на юг. Дорога Дерекей-Кыркларели-Бабаески-Пехливанкой, ведущая к границе с Азией, обеспечивает связь с Болгарией. Другая ось - октябрьская шоссе Иглеада-Демиркой-Пинархисар-Люлебургаз, соединяющее Черное море.

В провинции две оси транспорта с севера на юг и две оси с востока на запад, имеющие форму сетки, позволяют всем населенным пунктам пользоваться этими осями. Кроме того, на северо-востоке с Черным морем соединяется связь Бююккарештыр-Виза-Кайыкей. Эта ось немного севернее Октябрьского района снова соединяется с Источархисаром. Район Кофчаз имеет прямую связь с Кыркларели. Транспорт района Пехливанкой осуществляется по дороге, отделенной от автомобильной дороги Д-100. Недалеко от Кыркларели-Альпуллу дорога, отделенная от шоссе Д-100, также соединяется с Текирдагом через Хайраболу.

Кроме них, в общей сложности 1932 километра проселочных дорог, в том числе 1123 километра асфальтированных, 701 километр стабилизированных, 24 километра выравнивающих и 84 километра сырых. Из 175 наших деревень 172, то есть 98 процентов, дороги асфальтированы.

Железнодорожный транспорт является второй по значимости транспортной системой фракийского региона. Линия, входящая в провинциальные границы из Тюркгельди, достигает Эдирне через Альпуллу - Пехливанке и обеспечивает связь с Европой. Линия, отделенная от Альпуллу, также соединяется с провинциальным центром Кыркларели. Районы Бабаески и Люлебургаз также пользуются служебной линией и железной дорогой около

шести километров. Участок железной дороги в границах провинции составляет 110 километров.

На побережье Черного моря, которое находится в 60 километрах от провинции, Иглеада и Кайыкей являются двумя важными морскими транспортными центрами. Связь Кырларели с Черным морем происходит от порта Иглеада, расположенного в 100 километрах от провинциального центра. Порт Иглеада был построен как приют для рыбаков и введен в эксплуатацию в 1972 году. Портовые объекты Иглеады управляются Портовым управлением Иглеады, подчиненным морскому ведомству. В порту установлены два причала. Длина дока для эвакуации составляет 150 метров, а дока для рыбалки - 60 метров. На эвакуационном доке Тахмилль могут погрузочно-разгрузочно-разгрузочные работы пять судов на 150 град.

1.5. Выбор площадки строительства АЭС

На основании заданных критериев обследовать и выбрать район строительства АЭС и, в частности, АЭС с реактором ВВЭР-1200 . Место строительства предлагается находиться в коммуне Кыйыкёй в районе Визе, провинция Кырларели.

Расположение АЭС в коммуне Кыйыкёйа - равнинная местность, удобная для изысканий и строительства. Расположение у моря обеспечивает подачу воды на завод. Благодаря тому, что он находится недалеко от шоссе Д-100 , он удобен для перевозки оборудования, геодезических бригад и инженеров-строителей.



Рис.1.3. Карта провинции Тханьхоа и выбранная территория АЭС

ГЛАВА 2. РАСЧЕТ ТЕПЛОВОЙ СХЕМЫ ЭНЕРГБЛОКА АЭС

2.1. Выбор основные технологические параметров контура рабочего тела

Задачей данного раздела является определение давления и температуры генерируемого пара, давления конденсации и оптимальной температуры питательной воды. Используемые формулы взяты из учебных пособий [9, 10]. Все термодинамические свойства воды и водяного пара определены с помощью расширения Thermodynamics, установленного установленного в Microsoft excel и с помощью программы United Cycle, справочников теплофизических свойств воды и водяного пара [5].

Исходные данные:

На таблице 2.1 показаны исходные данные расчета тепловой схемы энергоблока АЭС

Таблица 2.1

Исходные данные для АЭС ВВЭР-1200

Параметр, название, размерность	Значение
$N_{эл}$ - электрическая мощность АЭС нетто, МВт	1200
$Q_{тф}$ - теплофикационная нагрузка, Гкал/час	250
T_1 - номинальная температура теплоносителя 1-ого контура на выходе из реактора, °С	326
$t_{охл}^{вх}$ - расчетная температура охлаждающей воды, °С	15
Расчетная температура прямой сетевой воды, °С	130
Тип парогенератора	вертикальный насыщенный пара
Тип реактора	ВВЭР
Число оборотов турбины, об/мин	3000
Тип привода питательного насоса	электропривод

1) Требуемая тепловая мощность энергоблока в первом приближении

$$Q_1 = \frac{N_{\text{эл}}}{\eta_{\text{аэс}}} + Q_{\text{т}} = \frac{1200}{0,33} + \frac{290,75}{0,998} = 3927,11 \text{ МВт};$$

250 Гкал/час равно 290,75 МВт

2) Температура теплоносителя на входе в реактор (на выходе из ПГ)

$$T_2 = T_1 - \Delta T_{\text{гр}} = 326 - 30 = 296 \text{ }^\circ\text{C};$$

3) Расход теплоносителя

$$P_1 = 16 \text{ МПа};$$

$$\bar{T} = \frac{T_2 + T_1}{2} = \frac{296 + 326}{2} = 311 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$c_{p_{\text{т}}} = f(\bar{T}, P_1) = 5,719 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

$$G_{\text{т}} = \frac{Q_1 \cdot \eta_{\text{уд}} \cdot 10^3}{\Delta T_{\text{гр}} \cdot c_{p_{\text{т}}}} = \frac{3927,11 \cdot 0,998 \cdot 10^3}{30 \cdot 5,719} = 22843,5 \frac{\text{кг}}{\text{с}};$$

4) Температура охлаждения воды на выходе из конденсатора

$$t_{\text{охл}}^{\text{вых}} = t_{\text{охл}}^{\text{вх}} + \Delta t_{\text{охл}} = 15 + 7 = 22 \text{ }^\circ\text{C};$$

5) Температура конденсации пара

$$t_{\text{к}}^{\text{с}} = t_{\text{охл}}^{\text{вх}} + 10 = 32^\circ\text{C}; \quad p_{\text{к}}^{\text{с}} = 4,75 \text{ кПа}$$

6) Давление и температура генерируемого пара

Принимаем:

$$P_s = 6,89 \text{ МПа};$$

$$t_s = f(P_s) = 285^\circ\text{C};$$

7) Оптимальное значение температуры питательной воды

Для ВВЭР 1200 принимаем $t_{\text{п.в.}} = 227^\circ\text{C}$

8) Расход питательной воды

$$h^{\text{вых}}(6,89 \text{ МПа}; 288^\circ\text{C}) = 2778,8 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

$$h^{\text{пв}}(6,89 \text{ МПа}; 227^\circ\text{C}) = 977,15 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

$$G_{\text{п.в.}} = \frac{Q \cdot \eta_{\text{уд}} \cdot 10^3}{h^{\text{вых}} - h^{\text{пв}}} = \frac{3927,11 \cdot 0,998 \cdot 10^3}{2778,8 - 977,15} = 2169,7 \text{ кг/с}$$

9) Требуемая мощность экономайзерного участка

$$h(6,89 \text{ МПа}; 285^\circ\text{C}) = 1262 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

$$Q_{\text{эу}} = G_{\text{пв}} \cdot (h' - h^{\text{пв}}) = 2169,7 \cdot (1241 - 977,15) = 569,4 \text{ МВт}$$

10) Температура теплоносителя на входе в экономайзерный участок:

$$T_{\text{Т}}^{\text{вх}} = T_{\text{пг}}^{\text{вых}} + \frac{Q_{\text{эу}}}{C_{\text{рт}} \cdot G_{\text{Т}}} = 296 + \frac{569,4 \cdot 10^6}{5,719 \cdot 22843,5 \cdot 10^3} = 301 \text{ }^\circ\text{C}$$

11) Расчетное значение температуры рабочего тела на выходе из экономайзерного участка

$$t_{\text{с}}^{\text{расч}} = T_{\text{Т}}^{\text{вх}} - 15 = 301 - 15 = 286 \text{ }^\circ\text{C}$$

12) Расчетное значение давления генерируемого пара

$$P_{\text{с}}^{\text{расч}} = f(t_{\text{с}}^{\text{расч}}) = f(286 \text{ }^\circ\text{C}) = 6,87 \text{ МПа}$$

$$13) \Delta P_{\text{с}} = (P_{\text{с}}^{\text{прин}} - P_{\text{с}}^{\text{расч}}) = |6,89 - 6,87| = 0,02 \text{ МПа} < 0,05 \text{ МПа}$$

Так как $|\Delta P_{\text{с}}| = 0 \text{ МПа} < 0,05 \text{ МПа}$, расчет выполнен точно в рассматриваемом интервале.

14) Расчетная энтальпия:

$$h_{\text{с}}(6,89 \text{ МПа}) = 2774 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Таблица 2.2

Полученные параметры

Параметр	Значение
P_S	6,89 МПа
h_S	$2774 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$
t_S	286°C
$t_{\text{п.в.}}$	227°C
$G_{\text{п.в.}}$	2169,7 кг/с
Q_1	3927,11 МВт
$Q_{\text{эу}}$	569,4 МВт
ΔP_S	0,001 МПа
p_K^S	4,75 кПа

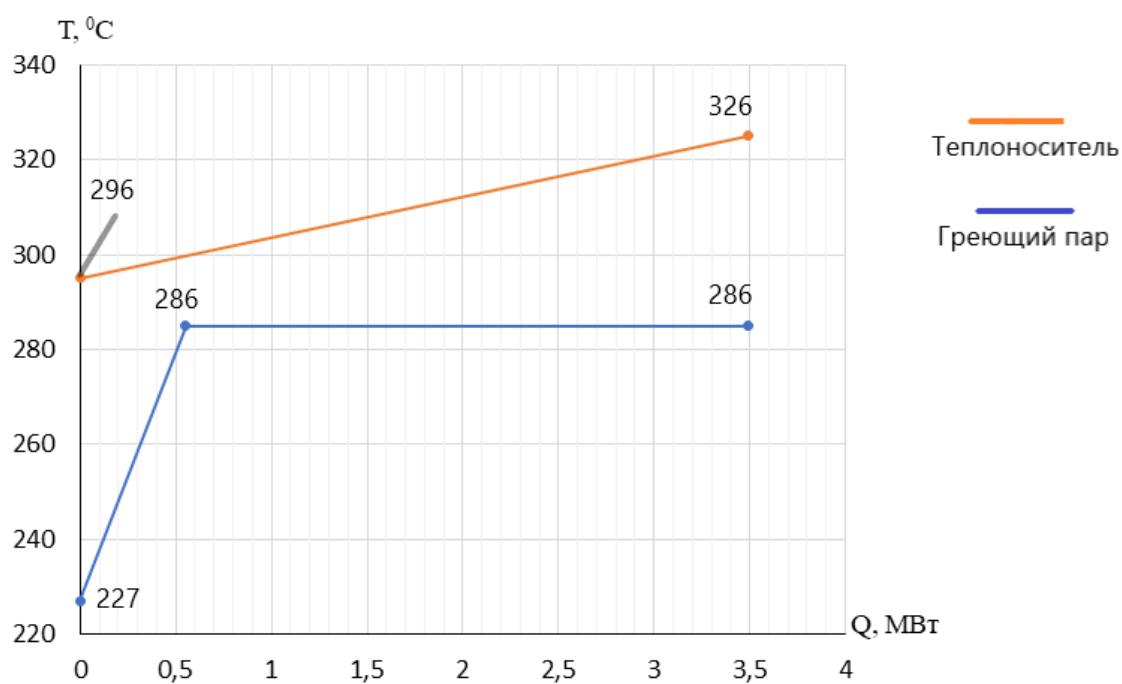


Рис.2.1. T-Q диаграмма нагрева в горизонтальном парогенераторе энергоблока

2.2. Определение необходимого числа регенеративных подогревателей и давлений пара в отборах турбин.

1) Температура питательной воды

ПНД: $\Delta t = 25 \div 30 \text{ }^\circ\text{C}$

ПВД: $\Delta t = 18 \div 24 \text{ }^\circ\text{C}$

Охладители эжекторов: $\Delta t = 3 \div 5 \text{ }^\circ\text{C}$

Примем величину подогрева питательной воды в ПНД равной:

$$\Delta t_{\text{пнд}} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$$

Примем величину подогрева питательной воды в ПВД равной:

$$\Delta t_{\text{пвд}} = 20,7 \text{ }^\circ\text{C}$$

Примем величину подогрева питательной воды в охладительном эжекторе равной:

$$\Delta t_{\text{оэ}} = 4 \text{ }^\circ\text{C}$$

Примем величину подогрева питательной воды в деаэраторе равной:

$$\Delta t_{\text{д}} = 15 \text{ }^\circ\text{C}$$

2) Давление в деаэраторе

$$P_{\text{д}} = 0,6 \div 1,2 \text{ МПа}$$

Примем давление в деаэраторе равным:

$$p_{\text{д}} = 1 \text{ МПа}$$

3) Количество подогревателей низкого и высокого давлений

В первом приближении примем, что система регенеративного подогрева питательной воды включает в себя 2 ПВД и 5 ПНД.

4) Необходимый напор питательного насоса

$$\Delta p_{\text{пн}} = p_{\text{пг}} - p_{\text{д}} + \Delta p_{\text{пг}} + \Delta p_{\text{пит}} + \Delta p_{\text{рпк}} + n_{\text{пвд}} \cdot \Delta p_{\text{пвд}} + \Delta p_{\text{нив}},$$

где $p_{\text{пг}}$ – давление в парогенераторе;

$p_{\text{д}} = 1 \text{ МПа}$ – давление в деаэраторе;

$\Delta p_{\text{пг}} = 0,5 \text{ МПа}$ – сопротивление в парогенераторе (для прямоточного ПГ);

$\Delta p_{\text{пит}} = 0,3 \text{ МПа}$ – гидравлические потери питательного трубопровода;

$\Delta p_{\text{рпк}} = 1 \text{ МПа}$ – сопротивление регулятора питательного клапана;

$\Delta p_{\text{ПВД}} = 0,4 \text{ МПа}$ – сопротивление подогревателя высокого давления;

$\Delta p_{\text{НИВ}}$ – нивелирный напор (высота между ПГ и Деаэратором)

$$\Delta p_{\text{НИВ}} = \Delta p_{\text{разница высот}} - \Delta p_{\text{ур}}^{\text{Д}} + \Delta p_{\text{ур}}^{\text{ПГ}};$$

$$\Delta p_{\text{разница высот}} = (H_{\text{ПГ}} \cdot \rho_{\text{ПГ}}^{\text{ВХ}} - H_{\text{Д}} \cdot \rho_{\text{Д}}^{\text{ВЫХ}}) \cdot g, \text{ где}$$

$H_{\text{ПГ}} = 5 \text{ м}$ – высота ПГ над уровнем земли;

$H_{\text{Д}} = 15 \text{ м}$ – высота деаэратора над уровнем земли;

$$\rho_{\text{ПГ}} = f(P_{\text{ПГ}} + \Delta p_{\text{ПГ}}; t_{\text{ПГ}}^{\text{ВХ}}) = f(6,89 + 0,5 \text{ МПа}; 227 \cdot ^\circ\text{C}) = 742 \frac{\text{КГ}}{\text{М}^3}$$

$$\rho_{\text{Д}} = f(P_{\text{Д}}) = f(1 \text{ МПа}) = 887 \frac{\text{КГ}}{\text{М}^3}$$

$$\Delta p_{\text{разница высот}} = (8 \cdot 742 - 15 \cdot 887) \cdot 9,8 = -0,094 \text{ МПа};$$

$H_{\text{ур}}^{\text{Д}} = 3 \text{ м}$ – высота уровня воды в Деаэраторе;

$H_{\text{ур}}^{\text{ПГ}} = 8 \text{ м}$ – высота уровня воды в вертикальном ПГ;

$$\Delta p_{\text{ур}}^{\text{ПГ}} = H_{\text{ур}}^{\text{ПГ}} \cdot \rho_{\text{ПГ}} \cdot g = 8 \cdot 736 \cdot 9,8 = 0,058 \text{ МПа};$$

$$\Delta p_{\text{ур}}^{\text{Д}} = H_{\text{ур}}^{\text{Д}} \cdot \rho_{\text{Д}}^{\text{ВЫХ}} \cdot g = 3 \cdot 887 \cdot 9,8 = 0,026 \text{ МПа};$$

$$\Delta p_{\text{НИВ}} = -0,063 - 0,026 + 0,058 = -0,062 \text{ МПа};$$

$$\Delta p_{\text{ПН}} = 6,89 - 1 + 0,5 + 0,5 + 1 + 2 \cdot 0,4 - 0,063 = 8,38 \text{ МПа}$$

5) Необходимый напор конденсатного насоса

$$\Delta P_{\text{КН}} = P_{\text{деаэр}} - P_{\text{конденс}} + n \cdot \Delta P_{\text{ПНД}} + \Delta P_{\text{ОЭ}} + \Delta P_{\text{КТР}} + \Delta P_{\text{РКУ}} + \Delta P_{\text{БОУ}} + \Delta P_{\text{НИВ}},$$

где

$P_{\text{К}} = 0,004 \text{ МПа}$ – давление в конденсаторе;

$\Delta P_{\text{ПНД}} = 0,15 \text{ МПа}$ – сопротивление ПНД;

$\Delta P_{\text{ОЭ}} = 0,07 \text{ МПа}$ – сопротивление охладителей эжекторов;

$\Delta P_{\text{КТР}} = 0,2 \text{ МПа}$ – сопротивление в конденсатном тракте;

$\Delta P_{\text{РКУ}} = 0,3 \text{ МПа}$ – регулирующий клапан уровня;

$\Delta P_{\text{БОУ}} = 0,5 \text{ МПа}$ – сопротивление блочной обессоливающей установки

$\Delta P_{\text{НИВ}}$ – нивелирный напор

$$\Delta P_{\text{НИВ}} = \Delta P_{\text{раз.высот}} - \Delta P_{\text{ур}}^{\text{К}}$$

$$\Delta P_{\text{раз.высот}} = (H_{\text{Д}} \cdot \rho_{\text{Д}}^{\text{ВХ}} - H_{\text{К}} \cdot \rho_{\text{К}}^{\text{ВЫХ}}) \cdot g,$$

где $H_K = 3$ м высота расположения конденсатора, $H_D = 30$ м - высота расположения деаэратора.

$$\rho_D^{BX} = f(P_D; t_{BX}) = f(1 \text{ МПа}; 163 \text{ }^\circ\text{C}) = 905 \text{ кг/м}^3$$

$$\rho_K^{ВЫХ} = f(P_K; t_{ВЫХ}) = f(0,004 \text{ МПа}; 29^\circ\text{C}) = 996 \text{ кг/м}^3$$

$$\Delta P_{\text{раз.высот}} = (30 \cdot 905 - 3 \cdot 996) \cdot 9,8 = 0,24 \text{ МПа}$$

$$\Delta P_{\text{ур}}^K = H_{\text{ур}}^K \cdot \rho_K^{\text{ВЫХ}} \cdot g$$

$$\Delta P_{\text{ур}}^K = 3 \cdot 996 \cdot 9,8 = -0,03 \text{ МПа}$$

$$\Delta P_{\text{нив}} = 0,24 - 0,03 = 0,21 \text{ МПа}$$

$$\Delta P_{\text{кн}} = 1 - 0,004 + 4 \cdot 0,15 + 0,5 + 0,07 + 0,3 + 0,2 + 0,25 = 2,91 \text{ МПа}$$

б) Определение нагрева воды в питательном насосе

$$\Delta t_{\text{пн}} = \frac{\Delta p_{\text{пн}} \cdot \bar{V}_{\text{пн}}}{\eta_{\text{пн}} \cdot \bar{C}_{p \text{ пн}}},$$

где $\bar{V}_{\text{пн}}$ – удельный объем перекачиваемой насосом воды (как средняя величина на всасывании и напоре)

$$\bar{V}_{\text{пн}} = \frac{V_{\text{пн}}^{\text{до}} + V_{\text{пн}}^{\text{после}}}{2} = \frac{0,001127 + 0,00112}{2} = 0,001124 \text{ м}^3/\text{кг}$$

$\eta_{\text{пн}} = 0,81$ – КПД насоса

$\bar{C}_{p \text{ пн}}$ – удельная теплоемкость воды, перекачиваемой насосом

$$\bar{C}_{p \text{ пн}} = 4,386 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$$

$$\Delta t_{\text{пн}} = \frac{8,38 \cdot 10^6 \cdot 0,001124}{0,81 \cdot 4,386 \cdot 10^3} = 2,65 \text{ }^\circ\text{C}$$

7) Определение нагрева воды в конденсационном насосе

$$\Delta t_{\text{кн}} = \frac{\Delta p_{\text{кн}} \cdot \bar{V}_{\text{кн}}}{\eta_{\text{кн}} \cdot \bar{C}_{p \text{ кн}}},$$

где $\bar{V}_{\text{нас}}$ – удельный средний объем перекачиваемой насосом воды

$$\bar{V}_{\text{кн}} = \frac{V_{\text{кн}}^{\text{до}} + V_{\text{кн}}^{\text{после}}}{2} = \frac{0,001004 + 0,001003}{2} = 0,00103 \text{ м}^3/\text{кг}$$

$\eta_{\text{кн}} = 0,76$ – КПД насоса

$\bar{C}_{p \text{ кн}}$ – удельная средняя теплоемкость воды, перекачиваемой насосом

$$\bar{C}_{p \text{ кн}} = 4,177 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$$

$$\Delta t_{\text{кн}} = \frac{2,91 \cdot 10^6 \cdot 0,00103}{0,76 \cdot 4,177 \cdot 10^3} = 0,92 \text{ } ^\circ\text{C}$$

8) Температура воды на выходе из насосов

$$t_{\text{нас}}^{\text{ВЫХ}} = t_{\text{нас}}^{\text{ВХ}} + \Delta t_{\text{нас}}$$

$$t_{\text{пн}}^{\text{ВЫХ}} = 179,9 + 2,76 = 182,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$t_{\text{кн}}^{\text{ВЫХ}} = 29,1 + 0,9 = 30^\circ\text{C}$$

9) Требуемое количество подогревателей

$$n_{\text{пнд}} = \frac{t_{\text{д}}^{\text{S}} - t_{\text{к}}^{\text{S}} - \Delta t_{\text{оэ}} - \Delta t_{\text{кн}} - \Delta t_{\text{д}}}{\Delta t_{\text{пнд}}} = \frac{179,9 - 29 - 3 - 0,9 - 15}{25} = 5,159$$

$$n_{\text{пвд}} = \frac{t_{\text{пв}} - t_{\text{д}}^{\text{S}} - \Delta t_{\text{пн}}}{\Delta t_{\text{пвд}}} = \frac{227 - 179,9 - 2,65}{20,7} = 2,15$$

2.3. Распределение температуры по конденсатному тракту:

Берем $n_{\text{пнд}} = 5$, $n_{\text{пвд}} = 2$. Полученный недогрев до необходимых температур будем покрывать точками смешения, указанными на тепловой схеме.

1) Температуры основного конденсата на входе в каждый ПНД

На входе в ПНД-1:

$$t_{\text{пнд-1}}^{\text{ВХ}} = t_{\text{кн}}^{\text{ВЫХ}} + \Delta t_{\text{оэ}} = 31,9 + 4 = 35,9^\circ\text{C}$$

На входе в ПНД-2:

$$t_{\text{пнд-2}}^{\text{ВХ}} = t_{\text{пнд-1}}^{\text{ВХ}} + \Delta t_{\text{пнд}}^{\text{ОК}} = 33,9 + 22 = 60,9 \text{ } ^\circ\text{C}$$

На входе в ПНД-3:

$$t_{\text{пнд-3}}^{\text{ВХ}} = t_{\text{пнд-2}}^{\text{ВХ}} + \Delta t_{\text{пнд}}^{\text{ОК}} = 59,9 + 25 = 85,9 \text{ } ^\circ\text{C}$$

На входе в ПНД-4:

$$t_{\text{пнд-4}}^{\text{ВХ}} = t_{\text{пнд-3}}^{\text{ВХ}} + \Delta t_{\text{пнд}}^{\text{ОК}} = 85,9 + 25 = 110,9^\circ\text{C}$$

На входе в ПНД-5:

$$t_{\text{пнд-4}}^{\text{ВХ}} = t_{\text{д}}^{\text{ВХ}} - \Delta t_{\text{пнд}}^{\text{ОК}} = 164,9 - 25 = 139,9^\circ\text{C}$$

2) Температуры питательной воды на входе в каждый ПВД

На входе в ПВД-1:

$$t_{\text{ПВД-1}}^{\text{ВХ}} = t_{\text{д}}^{\text{С}} + \Delta t_{\text{ПН}} = 179,9 + 2,6 = 182,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

На входе в ПВД-2:

$$t_{\text{ПВД-2}}^{\text{ВХ}} = t_{\text{ПВД-1}}^{\text{ВХ}} + \Delta t_{\text{ПНД}}^{\text{ПВ}} = 182,6 + 20,7 = 203,2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Температура питательной воды на выходе из ПВД-2 будет отличаться от температуры подачи питательной воды в ПГ на 4 градуса. Значит, будем использовать точку смешения питательной воды с водой из СПП.

2.4. Определение параметров отборов

1) Требуемая температура конденсации греющего пара в каждом подогревателе

$$t_{\text{П}i}^{\text{С}} = t_{\text{П}i}^{\text{ВЫХ}} + \delta t_{\text{П}},$$

где $\delta t_{\text{П}}$ – недогрев воды на выходе из подогревателя до температуры насыщения греющего пара (5°C для ПНД и 3°C для ПВД)

Результаты представлены в виде таблицы 2.

2) Давление пара в отборах турбины

Давление пара в отборах турбины с учетом потерь давления в трубопроводе определяется по формуле:

$$P_{\text{отб}i} = \frac{P_{\text{П}r}^{\text{С}}}{1 - \Delta P_r},$$

где i – номер отбора в турбине по ходу расширения;

$$P_{\text{П}r}^{\text{С}} = f(t_{\text{П}i}^{\text{С}})$$

ΔP_r – относительная величина потерь давления от турбины до подогревателя:

$$\Delta P_r = \frac{11 - r}{100},$$

где r – номер регенеративного подогревателя по ходу воды, включая деаэрактор.

Результаты расчета представлены в виде таблицы 2.3.

Таблица 2.3

Давление пара в отборах

Наименование отбора	$t_{\Pi i}^s, ^\circ\text{C}$	$P_{\Pi r}^s, \text{МПа}$	ΔP_r	$P_{\text{отб}i}, \text{МПа}$
ПНД-1	65,9	0,026	0,1	0,027
ПНД-2	90,9	0,072	0,09	0,076
ПНД-3	115,9	0,174	0,08	0,18
ПНД-4	144,4	0,408	0,07	0,43
ПНД-5	169,9	0,79	0,06	0,85
Деаэратор	179,9	1	0,05	1,09
ПВД-1	206,2	1,77	0,04	1,94
ПВД-2	226,9	2,64	0,03	2,94

2.5. Расчет процесса расширения пара в проточной части турбины

Для расчёта процесса расширения необходимо располагать внутренними КПД отсеков. Эти показатели, приведенные в литературе, получены при перегретом паре. Если часть или все ступени отсека работают на влажном паре, то нужно учитывать это с помощью поправочного коэффициента:

$$\eta_{oi}^{\text{вл}} = \eta_{oi}^{\text{сух}} \cdot (1 - K_{\text{вл}} \cdot y)$$

где:

$\eta_{oi}^{\text{вл}}$ – относительный внутренний КПД при работе на влажном паре.

$\eta_{oi}^{\text{сух}}$ – относительный внутренний КПД при работе на перегретом паре.

$K_{\text{вл}}$ – поправочный коэффициент, учитывающий влияние влажности.

y – влажность в конце процесса расширения отсека.

Максимальная допустимая влажность на выходе из тихоходных турбин с числом оборотов 3000 об/мин представлена в таблице 2.4.

Таблица 2.4

Максимальная допустимая влажность на выходе из турбин

Максимальная допустимая влажность	y^{\max}
ЦВД	15 %
ЦНД	9 %

Диапазоны значений для поправочных коэффициентов отсеков представлены в таблице 2.5.

Таблица 2.5

Диапазоны значений для поправочных коэффициентов отсеков

Тип турбины	Цилиндр ТУ	$\eta_{0i}^{\text{сух}}$	$K_{\text{вл}}$
Насыщенного пара	ЦВД	0,86÷0,92	0,1÷0,5
	ЦНД	0,8÷0,85	0,2÷0,6

1) Диапазон значений для поправочных коэффициентов для влажного КПД

$$\eta_{0i}^{\text{вл}} = \eta_{0i}^{\text{сух}} (1 - K_{\text{вл}} y)$$

где $K_{\text{вл}}$ – поправочный коэффициент

y – влажность в конце процесса расширения

$\eta^{\text{сух}}$ – КПД отсека при работе на сухом пару

2) Давление пара перед стопорным регулирующим клапаном:

$$p_0 = p_{\text{пг}}^{\text{вых}} \cdot \frac{100 - \delta p_{\text{тр}}}{100},$$

где $\delta p_{\text{тр}}$ – относительные потери давления по паропроводу, принимаем $\delta p_{\text{тр}} = 5\%$;

$p_{\text{ПГ}}^{\text{ВЫХ}}$ – давление насыщенного пара на выходе из ПГ, равное 6,89 МПа

$$p_0 = 6,89 \cdot \frac{100 - 5}{100} = 6,55 \text{ МПа}$$

3) Давление пара перед первой ступенью цилиндра высокого давления

$$p'_0 = p_0 \cdot \frac{100 - \delta p_{\text{срк}}}{100},$$

где $\delta p_{\text{срк}}$ – потери в СРК, принимаем $\delta p_{\text{срк}} = 4\%$

$$p'_0 = 6,87 \cdot \frac{100 - 4}{100} = 6,28 \text{ МПа}$$

4) Параметры пара перед первой ступенью цилиндра высокого давления

$$h'_0 = h_0 = 2774 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

$$S'_0 = f(p'_0; h'_0) = f\left(6,28 \text{ МПа}; 2774 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}\right) = 5,86 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$$

5) Параметры пара на первом отборе

$$h_{1 \text{ ид}} = f(p_1; S'_0) = f\left(2,94 \text{ МПа}; 5,86 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}\right) = 2632 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

$$h_1^{\text{сух}} = h_0 - \eta_{01}^{\text{сух}}(h_0 - h_{1 \text{ ид}}) = 2762 - 0,86(2770 - 2632) = 2651 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

$$y_1 = f(p_1; h_1^{\text{сух}}) = f\left(2,67 \text{ МПа}; 2622 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}\right) = 0,084$$

$$\eta_{0i}^{\text{вл}} = \eta_{01}^{\text{сух}}(1 - K_{\text{вл}} y_1) = 0,88(1 - 0,5 \cdot 0,084) = 0,824$$

$$h_1^{\text{вл}} = h_{\text{ПГ}} - \eta_{0i}^{\text{вл}}(h_{\text{ПГ}} - h_{1 \text{ ид}}) = 2770 - 0,824(2770 - 2632) = 2657 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

$$S_1^{\text{вл}} = f(p_1; h_1^{\text{вл}}) = f\left(2,94 \text{ МПа}; 2657 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}\right) = 5,9 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$$

Повторяем аналогичные расчеты для остальных отборов из ЦВД, то есть для отборов в ПВД-2, ПВД-1, ПНД-5, ПНД-4 и в деаэратор.

б) Потери давления в сепараторе

$$\Delta P_{\text{сеп}} = 0,43 \cdot 0,04 = 0,017 \text{ МПа}$$

$$P_{\text{с}}^{\text{ВЫХ}} = P_{\text{ЦВД}}^{\text{ВЫХ}} - \Delta P_{\text{сеп}} = 0,43 - 0,017 = 0,41 \text{ МПа}$$

7) Потери на пароперегреватель

$$\Delta P_{\text{пп}} = 0,01 \cdot P_{\text{с}}^{\text{ВЫХ}} = 0,01 \cdot 0,4 = 0,004 \text{ МПа}$$

$$P_{\text{пп}}^{\text{ВЫХ}} = P_{\text{с}}^{\text{ВЫХ}} - n\Delta P_{\text{пп}} = 0,41 - 2 \cdot 0,004 = 0,4 \text{ МПа}$$

8) Потери давления в отсечной задвижке

$$\Delta P_{\text{оз}} = 0,02 \cdot P_{\text{пп}}^{\text{ВЫХ}} = 0,02 \cdot 0,41 = 0,008 \text{ МПа}$$

$$P_{\text{ЦНД}}^{\text{ВХ}} = P_{\text{пп}}^{\text{ВЫХ}} - \Delta P_{\text{оз}} = 0,41 - 0,08 = 0,4 \text{ МПа}$$

9) Температура пара на входе в ЦНД

Оптимальный температурный напор между перегреваемым паром и свежим составляет от 20 до 25 °С. Принимаем этот температурный напор $\delta t = 22^\circ\text{С}$.

$$t_{\text{ЦНД}}^{\text{ВХ}} = t_{\text{пг}} - \delta t = 285 - 22 = 263 \text{ }^\circ\text{С}$$

Повторяем аналогичный расчет процесса расширения пара в турбине для цилиндра низкого давления. Результаты расчета представлены в виде таблицы 2. 6.

Таблица 2.6

Характеристики процесса расширения пара в турбине

Наименование отбора	$P_{\text{отб}i}, \text{ МПа}$	$h_i^{\text{вл}}, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$\eta_{0i}^{\text{сух}}$	$\eta_{0i}^{\text{вл}}$	y
Выход из ПГ	6,89	2774	-	-	-
Вход в ЦВД	6,2	2774	-	-	0,005
1 (ПВД-2)	2,94	2675	0,86	0,824	0,084
2 (ПВД-1)	1,94	2630	0,86	0,813	0,11
д (Деаэратор)	1,09	2567	0,86	0,802	0,13
3 (ПНД-5)	0,85	2539	0,86	0,799	0,14
4 (ПНД-4)	0,43	2469	0,86	0,788	0,151
СПП	0,39	2991	-	-	-
5 (ПНД-3)	0,18	2851	0,8	0,83	-
6 (ПНД-2)	0,076	2716	0,8	0,83	-
7 (ПНД-1)	0,027	2594	0,8	0,79	0,019

Кд	0,0045	2408	0,8	0,77	0,072
----	--------	------	-----	------	-------



2.6. Расчет подогревателей сетевой воды

Результаты расчета подогревателей сетевой воды представлены в виде таблицы 2.7.

1) Требуемый расход сетевой воды

$$G_{\text{СВ}} = \frac{Q_{\text{тр}}}{C_{p \text{ СВ}}(t_{\text{пр}} - t_{\text{об}})},$$

где $C_{p \text{ СВ}}$ – удельная изобарная теплоёмкость сетевой воды;

$t_{\text{пр}}$ – температура прямой сетевой воды, задана по заданию;

$t_{\text{об}}$ – температура обратной сетевой воды, принимаем равной 70 °С.

$$C_{p \text{ СВ}} = f\left(P_{\text{СВ}}; \frac{t_{\text{пр}} + t_{\text{об}}}{2}\right) = f(1 \text{ МПа}; 100 \text{ °С}) = 4,228 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{°С}}$$

$$G_{\text{СВ}} = \frac{250 \cdot 1,163 \cdot 10^6}{4,228 \cdot 10^3 (130 - 70)} = 1144 \text{ кг/с}$$

2) Температура сетевой воды на выходе из ПСВ-1

$$t_{\text{ПСВ1}}^{\text{ВЫХ}} = t_{\text{об}} + \frac{t_{\text{пр}} - t_{\text{об}}}{2} = 70 + \frac{130 - 70}{2} = 100 \text{ °С}$$

3) Требуемая температура конденсации греющего пара в каждом сетевом подогревателе

$$t_{\text{ПСВ}i}^{\text{С}} = t_{\text{ПСВ}}^{\text{ВЫХ}} + \delta t,$$

где принимаем недогрев для ПСВ равным $\delta t = 5 \text{ °С}$.

$$t_{\text{ПСВ-1}}^{\text{С}} = t_{\text{ПСВ-1}}^{\text{ВЫХ}} + \delta t = 100 + 5 = 105 \text{ °С}$$

$$t_{\text{ПСВ-2}}^{\text{С}} = t_{\text{пр}} + \delta t = 130 + 5 = 135 \text{ °С}$$

4) Давление насыщения греющего пара в каждом сетевом подогревателе

$$P_{\text{ПСВ-1}}^{\text{С}} = f(t_{\text{ПСВ-1}}^{\text{С}}) = f(105 \text{ °С}) = 0,120 \text{ МПа}$$

$$P_{\text{ПСВ-2}}^{\text{С}} = f(t_{\text{ПСВ-2}}^{\text{С}}) = f(135 \text{ °С}) = 0,313 \text{ МПа}$$

По полученным необходимым давлениям насыщения греющего пара в каждом ПСВ можем определить, к каким отборам их целесообразно присоединить, таким образом, ПСВ-2 присоединяется к 3 отбору, а ПСВ-1 присоединяется к отбору 4.

$$P_{\text{ПСВ-2}}^s = P_i^{\text{отб}} - 0,03 = 0,85 - 0,03 = 0,82 \text{ МПа}$$

$$P_{\text{ПСВ-1}}^s = P_i^{\text{отб}} - 0,03 = 0,42 - 0,03 = 0,39 \text{ МПа}$$

где 0,03 МПа – потери в трубопроводе.

$$t_{\text{ПСВ-1}}^s = f(P_{\text{ПСВ-1}}^s) = f(0,39 \text{ МПа}) = 143 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$t_{\text{ПСВ-2}}^s = f(P_{\text{ПСВ-2}}^s) = f(0,8 \text{ МПа}) = 171 \text{ }^\circ\text{C}$$

5) Энтальпии греющего пара на входах в ПСВ

$$h_{\text{гр1}} = f(P_{\text{ПСВ-1}}^s; t_{\text{отб } 4}) = f(0,39 \text{ МПа}; 173 \text{ }^\circ\text{C}) = 2743 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

$$h_{\text{гр2}} = f(P_{\text{ПСВ-1}}^s; t_{\text{отб } 5}) = f(0,83 \text{ МПа}; 145 \text{ }^\circ\text{C}) = 2773 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

6) Энтальпия дренажа сетевых подогревателей

Принимаем температуру недогрева дренажа до температуры насыщения равной 5°С.

$$h_{\text{ПСВ-1}}^{\text{др}} = f(P_{\text{ПСВ-1}}^s; (t_{\text{ПСВ-1}}^s - \Delta t_{\text{др}})) = f(0,39 \text{ МПа}; 143 - 5^\circ\text{C}) = 461 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

$$h_{\text{ПСВ-2}}^{\text{др}} = f(P_{\text{ПСВ-2}}^s; (t_{\text{ПСВ-2}}^s - \Delta t_{\text{др}})) = f(0,82 \text{ МПа}; 171 - 5^\circ\text{C}) = 633 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

7) Расходы греющего пара на каждом ПСВ

$$G_{\text{ПСВ2}}^{\text{гр}} = \frac{G_{\text{св}} \cdot c_{\text{р св}} (t_{\text{пр}} - t_{\text{ПСВ1}}^{\text{вых}})}{h_{\text{ПСВ2}}^{\text{гр}} - h_{\text{ПСВ2}}^{\text{др}}} = \frac{1144 \cdot 4,228 \cdot 10^3 (130 - 100)}{(2743 - 633) \cdot 10^3} = 68,7 \text{ кг/с}$$

$$G_{\text{ПСВ1}}^{\text{гр}} = \frac{G_{\text{св}} \cdot c_{\text{р св}} (t_{\text{ПСВ1}}^{\text{вых}} - t_{\text{об}}) - G_{\text{ПСВ2}}^{\text{гр}} (h_{\text{ПСВ2}}^{\text{др}} - h_{\text{ПСВ1}}^{\text{др}})}{h_{\text{ПСВ1}}^{\text{гр}} - h_{\text{ПСВ1}}^{\text{др}}}$$

$$= \frac{1144 \cdot 4,228 \cdot 10^3 \cdot (100 - 70) - 68,5(633 - 461)}{(2772 - 461) \cdot 10^3} = 62,7 \text{ кг/с}$$

Таблица 2.7

Результаты расчетов подогревателей сетевой воды

Величина	Единицы измерения	Значение
$G_{\text{СВ}}$	кг/с	858
$t_{\text{ПСВ1}}^{\text{ВЫХ}}$	°С	100
$P_{\text{ПСВ-1}}^{\text{S}}$	МПа	0,39
$P_{\text{ПСВ-2}}^{\text{S}}$	МПа	0,82
$\delta t_{\text{ПСВ-1}}$	°С	33
$\delta t_{\text{ПСВ-2}}$	°С	21
$G_{\text{ПСВ-1}}^{\text{ГР}}$	кг/с	68,7
$G_{\text{ПСВ-2}}^{\text{ГР}}$	кг/с	62,7

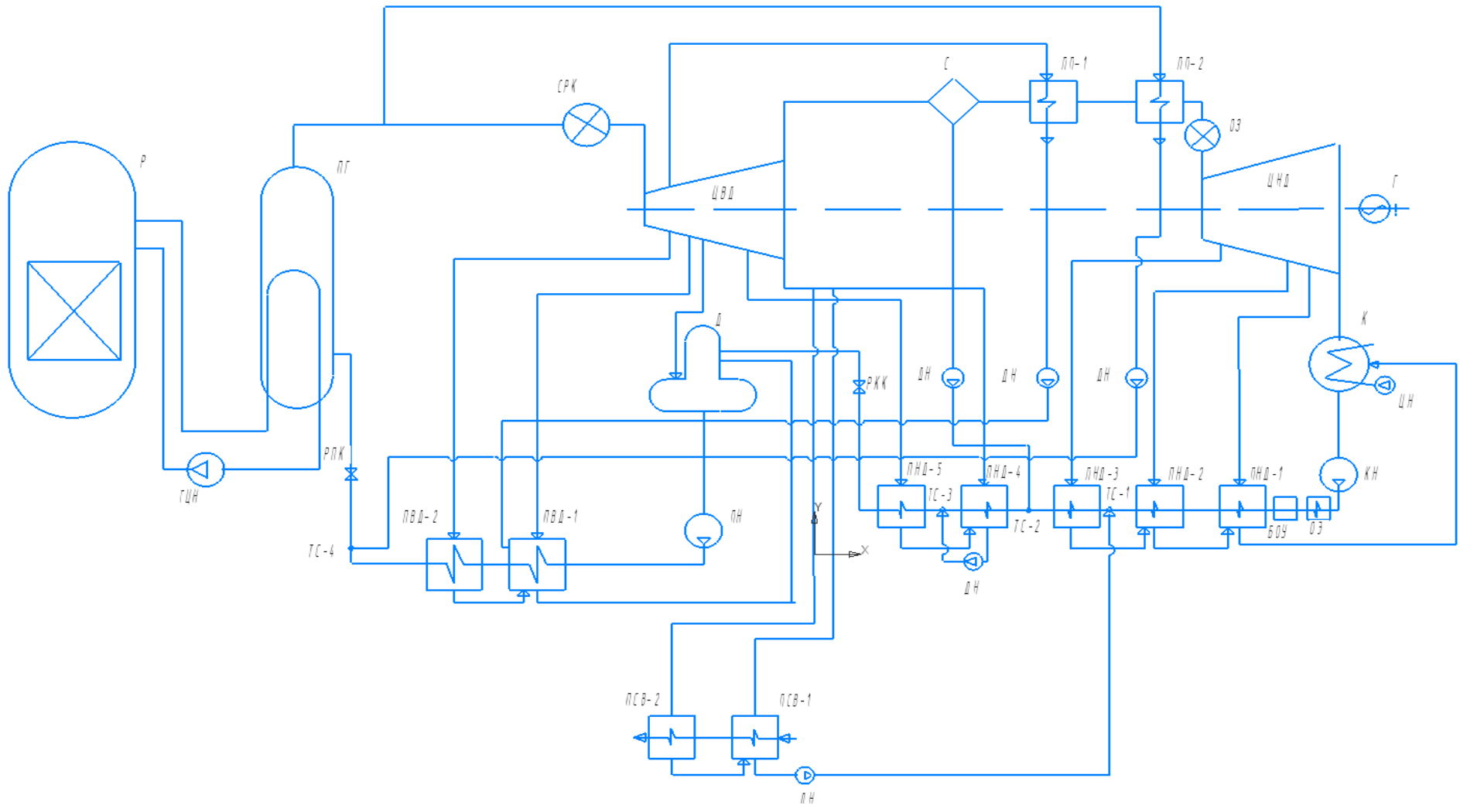


Рис.2.2. Принципиальная тепловая схема АЭС с реактором типа ВВЭР -1200 построена в программе Компаса

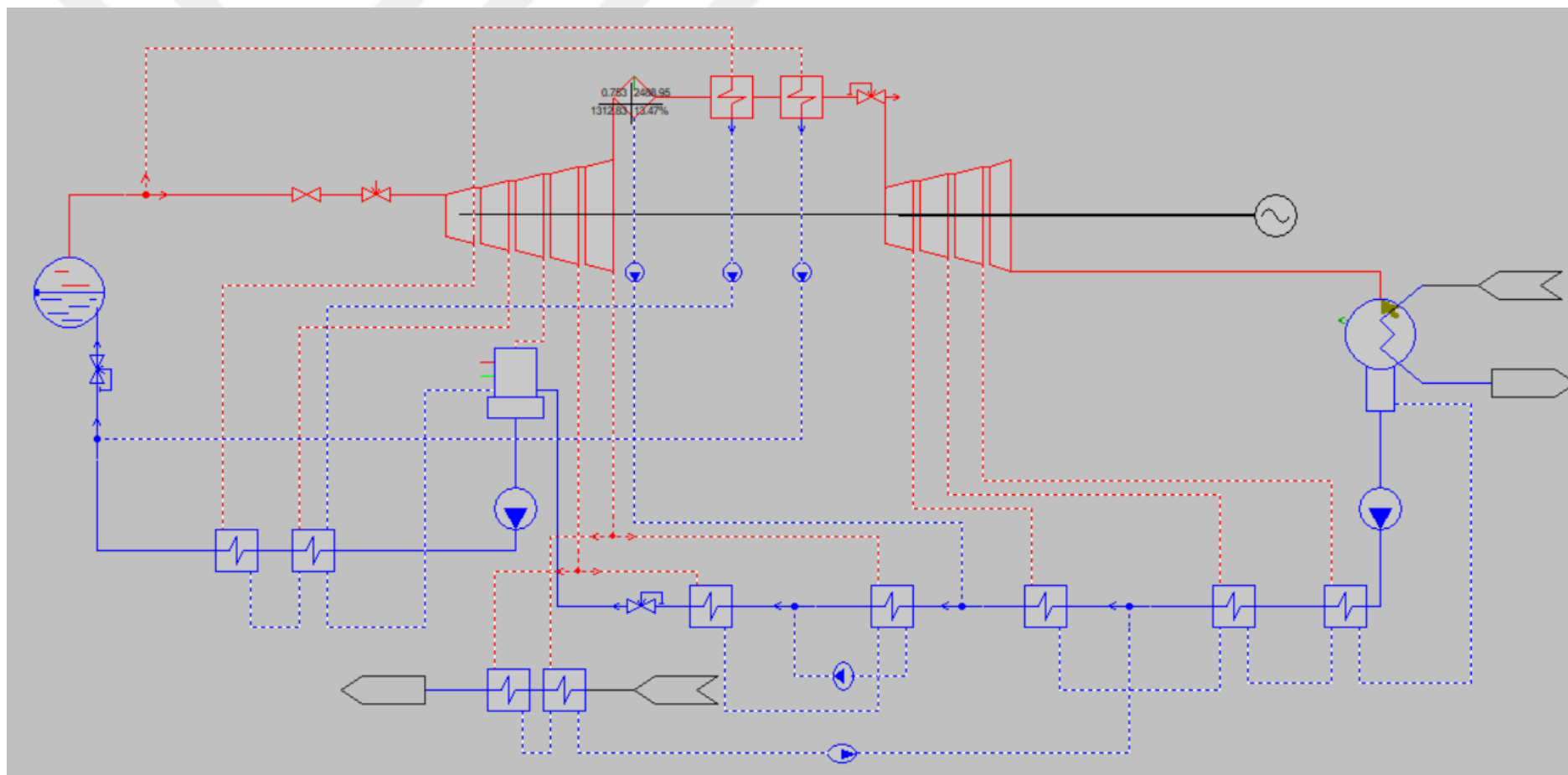
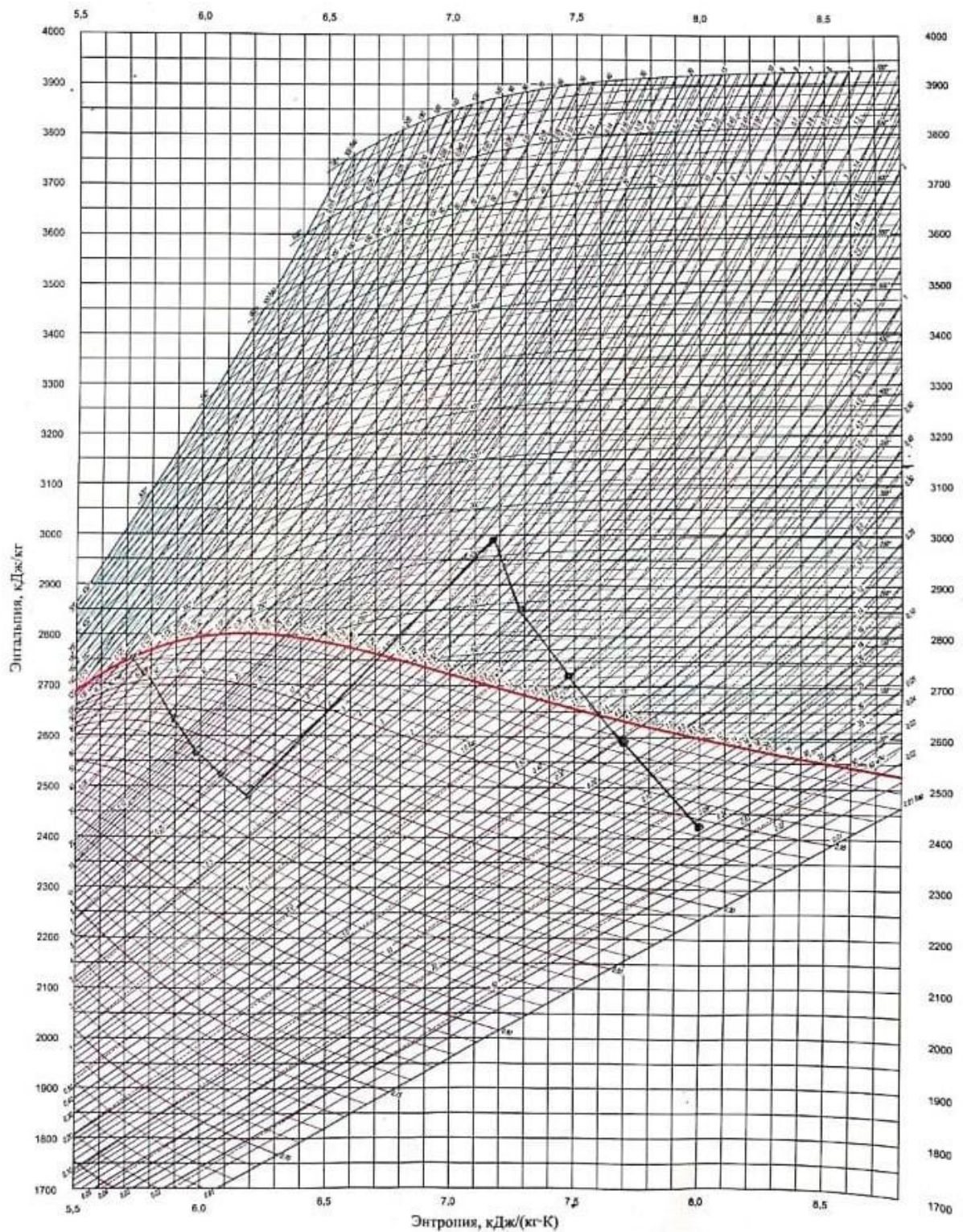


Рис.2.3. Принципиальная тепловая схема АЭС с реактором типа ВВЭР -1200 построена в программе United Cycle



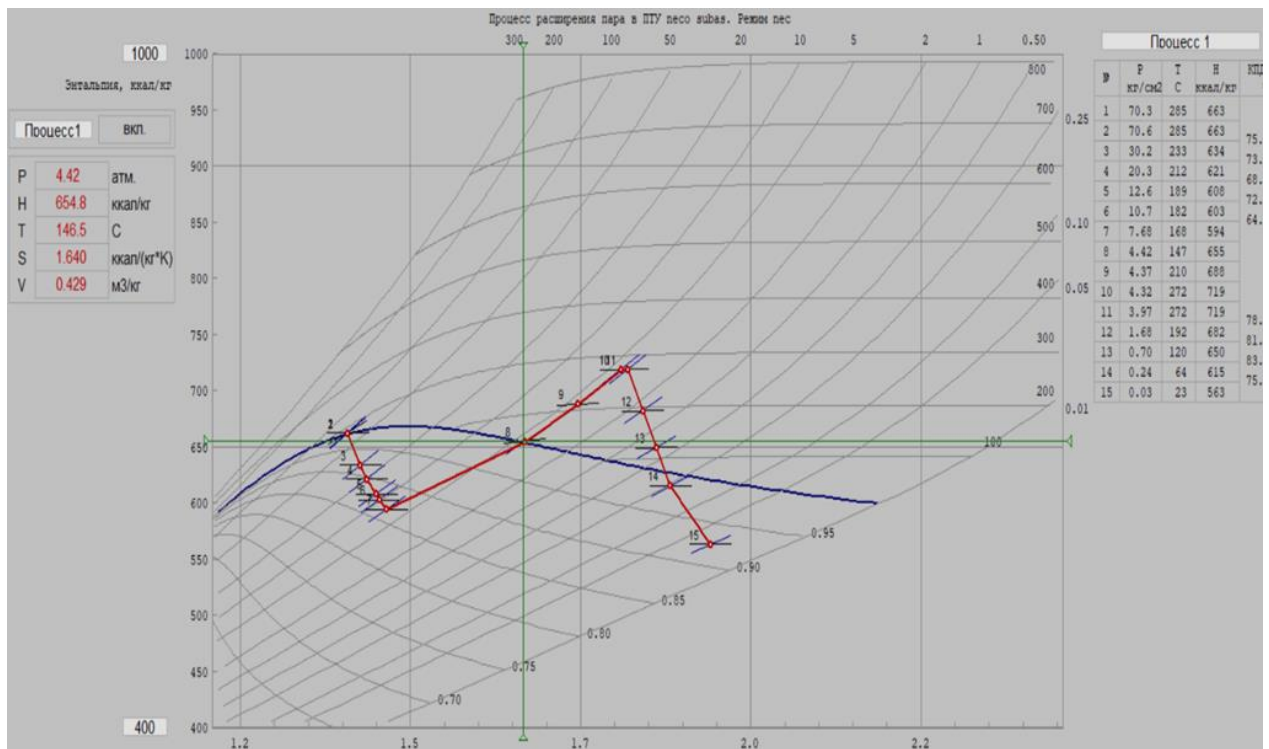


Рис.2.5. Процесс расширения пара в турбине в программе United Cycle

2.7. Определение расходов среды по элементам схемы

Расчет выполняется на основе тепловых и материальных балансов уравнений. Уравнения записываются для каждого элемента схемы и точек смешения последовательно.

Расчеты выполнены с приближением, что при каскадном сливе конденсата из одного подогревателя в другой или из ПНД-1 в конденсатор используют дросселирование конденсата, чтобы уменьшить давление конденсата на выходе из подогревателя до необходимо значения давления в последующем элементе. При этом температура конденсата уменьшается, а энтальпия остается постоянной.

Запишем уравнение материального баланса для точки смешения ТС-4 после ПВД-2:

$$G_{\text{д}}^{\text{ВЫХ}} h_{\text{ПВД-2}}^{\text{ВЫХ}} + G_{\text{ПП-2}} h_{\text{ПП-2}}^{\text{ДР}} = G_{\text{ПВ}} h_{\text{ПВ}}$$

$$\text{Примем } G_{\text{ПП-2}} = 83 \frac{\text{КГ}}{\text{С}}$$

$$h_{\text{ПВД-2}}^{\text{ВЫХ}} = 965 \frac{\text{КДЖ}}{\text{КГ}}$$

$$G_{\text{д}}^{\text{ВЫХ}} = G_{\text{ПВ}} - G_{\text{ПП-2}} = 2169,7 - 84 = 2085,7 \frac{\text{КГ}}{\text{С}}$$

Запишем уравнение материального баланса для ПВД-2:

$$G_{\text{д}}^{\text{ВЫХ}} \cdot (h_{\text{ПВД-2}}^{\text{ВЫХ}} - h_{\text{ПВД-1}}^{\text{ВЫХ}}) = G_{\text{ОТБ 1}} (h_{\text{ОТБ 1}} - h_{\text{ПВД7}}^{\text{ДР}})$$

$$h_{\text{ПВД-2}}^{\text{ДР}} = f(P_{\text{П7}}^{\text{С}}; t_{\text{ОТБ 1}}^{\text{С}} - 10 \text{ } ^\circ\text{C}) = 976 \frac{\text{КДЖ}}{\text{КГ}}$$

$$G_{\text{ОТБ 1}} = \frac{G_{\text{д}}^{\text{ВЫХ}} \cdot (h_{\text{ПВД-2}}^{\text{ВЫХ}} - h_{\text{ПВД-1}}^{\text{ВЫХ}})}{h_{\text{ОТБ 1}} - h_{\text{ПВД-2}}^{\text{ДР}}} = \frac{2085,7 \cdot (965 - 870)}{2675 - 976} = 116,6 \frac{\text{КГ}}{\text{С}}$$

Запишем уравнение материального баланса для ПВД-1:

$$\begin{aligned} G_{\text{д}}^{\text{ВЫХ}} \cdot (h_{\text{ПВД-1}}^{\text{ВЫХ}} - h_{\text{ПВД1}}^{\text{ВХ}}) \\ = G_{\text{ОТБ 2}} (h_{\text{ОТБ 2}} - h_{\text{ПВД-1}}^{\text{ДР}}) + G_{\text{ПП-1}} (h_{\text{ПП-1}}^{\text{ДР}} - h_{\text{ПВД-1}}^{\text{ДР}}) \\ + G_{\text{ОТБ 1}} (h_{\text{ПВД-2}}^{\text{ДР}} - h_{\text{ПВД-1}}^{\text{ДР}}) \end{aligned}$$

$$\text{Примем } G_{\text{ПП-1}} = 99 \frac{\text{КГ}}{\text{С}}$$

$$G_{\text{отб } 2} = \frac{G_{\text{д}}^{\text{ввых}} \cdot (h_{\text{пвд}-1}^{\text{ввых}} - h_{\text{пвд}-1}^{\text{вх}}) - G_{\text{пп}-1} (h_{\text{пп}-1}^{\text{др}} - h_{\text{пвд}-1}^{\text{др}}) - G_{\text{отб } 1} (h_{\text{пвд}-2}^{\text{др}} - h_{\text{пвд}-1}^{\text{др}})}{h_{\text{отб } 2} - h_{\text{пвд}-1}^{\text{др}}}$$

$$h_{\text{пп}-1}^{\text{др}} = f(P_{\text{отб } 2}; t_{\text{отб } 2}^s) = 1229 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

$$h_{\text{пвд}-1}^{\text{др}} = f(P_{\text{пвд}}^s; t_{\text{отб } 2}^s - 10 \text{ } ^\circ\text{C}) = 880 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

$$G_{\text{отб } 2} = \frac{2085,7 \cdot (870 - 779) - 99 \cdot (1229 - 880) - 84 \cdot (976 - 880)}{2596 - 880} = 85,7 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

Запишем уравнение материального баланса для деаэратора:

$$G_{\text{д}}^{\text{ввых}} \cdot h_{\text{д}}^{\text{ввых}} = G_{\text{д}}^{\text{вх}} \cdot h_{\text{д}}^{\text{вх}} + G_{\text{отб } \text{д}} \cdot h_{\text{отб } \text{д}} + h_{\text{пвд}-1}^{\text{др}} (G_{\text{отб } 1} + G_{\text{пп}-1} + G_{\text{отб } 2})$$

$$G_{\text{д}}^{\text{вх}} + G_{\text{отб } 1} + G_{\text{пп}-1} + G_{\text{отб } 2} + G_{\text{отб } \text{д}} = G_{\text{д}}^{\text{ввых}}$$

$$G_{\text{отб } \text{д}} = G_{\text{д}}^{\text{ввых}} - G_{\text{д}}^{\text{вх}} - G_{\text{отб } 1} - G_{\text{пп}-1} - G_{\text{отб } 2}$$

$$G_{\text{д}}^{\text{ввых}} \cdot h_{\text{д}}^{\text{ввых}} = G_{\text{д}}^{\text{вх}} \cdot h_{\text{д}}^{\text{вх}} + (G_{\text{д}}^{\text{ввых}} - G_{\text{д}}^{\text{вх}} - G_{\text{отб } 1} - G_{\text{пп}-1} - G_{\text{отб } 2}) \cdot h_{\text{отб } \text{д}} + h_{\text{пвд}-1}^{\text{др}} (G_{\text{отб } 1} + G_{\text{пп}-1} + G_{\text{отб } 2})$$

$$G_{\text{д}}^{\text{вх}} = \frac{G_{\text{д}}^{\text{ввых}} \cdot (h_{\text{отб } \text{д}} - h_{\text{д}}^{\text{ввых}}) - (G_{\text{отб } 1} + G_{\text{пп}-1} + G_{\text{отб } 2}) \cdot (h_{\text{отб } \text{д}} - h_{\text{пвд}-1}^{\text{др}})}{h_{\text{отб } \text{д}} - h_{\text{д}}^{\text{вх}}}$$

$$G_{\text{д}}^{\text{вх}} = \frac{2085,7 \cdot (2516 - 763) - (116,6 + 99 + 85,7) \cdot (2516 - 880)}{2516 - 698} = 1740 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

$$G_{\text{отб } \text{д}} = G_{\text{д}}^{\text{ввых}} - G_{\text{д}}^{\text{вх}} - G_{\text{отб } 1} - G_{\text{пп}-1} - G_{\text{отб } 2} = 2085,7 - 1740 - 116,6 - 99 - 85,7 = 44,4 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

Запишем уравнение материального баланса для ПНД-5:

$$G_{\text{к}} \cdot (h_{\text{пнд}-5}^{\text{ввых}} - h_{\text{пнд}-5}^{\text{вх}}) = G_{\text{отб } 3} \cdot (h_{\text{отб } 3} - h_{\text{пнд}-5}^{\text{др}})$$

$$G_{\text{отб } 3} = \frac{G_{\text{д}}^{\text{вх}} \cdot (h_{\text{пнд}-5}^{\text{ввых}} - h_{\text{пнд}-5}^{\text{вх}})}{h_{\text{отб } 3} - h_{\text{пнд}-5}^{\text{др}}} = \frac{1740 \cdot (698 - 590)}{2489 - 719} = 106,1 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

Запишем уравнение материального баланса для ПНД-4:

$$G_{\text{к}} \cdot (h_{\text{пнд}-4}^{\text{ввых}} - h_{\text{пнд}-4}^{\text{вх}}) = G_{\text{отб } 4} \cdot (h_{\text{отб } 4} - h_{\text{пнд}-4}^{\text{др}})$$

$$G_{\text{отб } 4} = \frac{G_{\text{нк}} \cdot (h_{\text{пнд}-4}^{\text{ввых}} - h_{\text{пнд}-4}^{\text{вх}}) - G_{\text{отб } 3} (h_{\text{пнд}-5}^{\text{др}} - h_{\text{пнд}-4}^{\text{др}})}{h_{\text{отб } 4} - h_{\text{пнд}-4}^{\text{др}}}$$

$$\text{Примем } G_{\text{нк}} = 1376 \frac{\text{кг}}{\text{с}}, h_{\text{пнд}-4}^{\text{вх}} = 488 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

$$G_{\text{отб } 4} = \frac{1376 \cdot (588 - 488) - 106,1 \cdot (719 - 608)}{2394 - 608} = 70,4 \frac{\text{КГ}}{\text{С}}$$

$$G_{\text{нк}} = G_{\text{д}}^{\text{ВХ}} - (G_{\text{отб } 3} + G_{\text{отб } 4}) = 1740 - (106,1 + 70,4) = 1563,5 \frac{\text{КГ}}{\text{С}}$$

Запишем уравнение материального баланса для точки смешения ТС-3 перед ПНД-5:

$$G_{\text{д}}^{\text{ВХ}} h_{\text{ПНД-5}}^{\text{ВХ}} = (G_{\text{отб } 3} + G_{\text{отб } 4}) h_{\text{ПНД-4}}^{\text{ДР}} + G_{\text{нк}} h_{\text{ПНД-4}}^{\text{ВХ}}$$

$$h_{\text{ПНД-4}}^{\text{ВХ}} = \frac{(G_{\text{отб } 3} + G_{\text{отб } 4}) h_{\text{ПНД-4}}^{\text{ДР}} + G_{\text{д}}^{\text{ВХ}} h_{\text{ПНД-5}}^{\text{ВХ}}}{G_{\text{нк}}} = 588 \frac{\text{КДЖ}}{\text{КГ}},$$

что совпадает с принятым ранее значением, таким образом подогрев воды в

ТС-3:

$$\Delta t_{\text{ТС-3}} = t(p_{\text{ПНД-2}}^{\text{ВЫХ}}, h_{\text{ПНД-3}}^{\text{ВХ}}) - t(p_{\text{ПНД-2}}^{\text{ВЫХ}}, h_{\text{ПНД-2}}^{\text{ВЫХ}}) = 2,6 \text{ } ^\circ\text{С}$$

Рассмотрим уравнение материального баланса для точки смешения ТС-2 перед ПНД-4:

$$G_{\text{С}} = (G_{\text{пв}} - G_{\text{пп-1}} - G_{\text{пп-2}} - G_{\text{отб } 1} - G_{\text{отб } 2} - G_{\text{отб } 3} - G_{\text{отб } 4} - G_{\text{отб } \text{д}} - G_{\text{псв-1}} - G_{\text{псв-2}}) y = 202 \frac{\text{КГ}}{\text{С}}$$

$$G_{\text{к}} = G_{\text{нк}} - G_{\text{С}} = 1563 - 202 = 1361 \frac{\text{КГ}}{\text{С}}$$

$$h_{\text{ПНД-4}}^{\text{ВХ}} = \frac{G_{\text{к}} h_{\text{ПНД-3}}^{\text{ВЫХ}} + G_{\text{С}} h_{\text{С}}^{\text{ДР}}}{G_{\text{нк}}} = 488 \frac{\text{КДЖ}}{\text{КГ}}$$

что совпадает с принятым ранее значением, таким образом подогрев воды в

ТС-2:

$$\Delta t_{\text{ТС-2}} = t(p_{\text{ПНД-3}}^{\text{ВЫХ}}, h_{\text{ПНД-4}}^{\text{ВХ}}) - t(p_{\text{ПНД-3}}^{\text{ВЫХ}}, h_{\text{ПНД-3}}^{\text{ВЫХ}}) = 4,9 \text{ } ^\circ\text{С}$$

Рассмотрим уравнение материального баланса для точки смешения ТС-1 перед ПНД-3:

$$G_{\text{ок}} = G_{\text{к}} - G_{\text{грпсв1}} - G_{\text{грпсв2}} = 1361 - 58,2 - 68,5 = 1234,3 \frac{\text{КГ}}{\text{С}}$$

$$h_{\text{ПНД-3}}^{\text{ВХ}} = \frac{G_{\text{ок}} h_{\text{ПНД-2}}^{\text{ВЫХ}} + (G_{\text{грпсв1}} + G_{\text{грпсв2}}) h_{\text{псв1}}^{\text{ДР}}}{G_{\text{к}}} = 373 \frac{\text{КДЖ}}{\text{КГ}}$$

таким образом подогрев воды в ТС-1:

$$\Delta t_{ТС-1} = t(p_{\text{ПНД-4}}^{\text{ВЫХ}}, h_{\text{ПНД-5}}^{\text{ВХ}}) - t(p_{\text{ПНД-4}}^{\text{ВЫХ}}, h_{\text{ПНД-4}}^{\text{ВЫХ}}) = 1,8 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$G_{\text{отб } 5} = \frac{G_{\text{к}} \cdot (h_{\text{ПНД-3}}^{\text{ВЫХ}} - h_{\text{ПНД-2}}^{\text{ВЫХ}})}{h_{\text{отб } 5} - h_{\text{ПНД-3}}^{\text{ДР}}}$$

$$G_{\text{отб } 5} = \frac{1361 \cdot (467 - 373)}{2851 - 487} = 46,8 \frac{\text{КГ}}{\text{С}}$$

$$G_{\text{отб } 6} = \frac{G_{\text{к}} \cdot (h_{\text{ПНД-2}}^{\text{ВЫХ}} - h_{\text{ПНД-1}}^{\text{ВЫХ}}) - G_{\text{отб } 5} (h_{\text{ПНД-3}}^{\text{ДР}} - h_{\text{ПНД-2}}^{\text{ДР}})}{h_{\text{отб } 6} - h_{\text{ПНД-2}}^{\text{ДР}}}$$

$$G_{\text{отб } 6} = \frac{1361 \cdot (373 - 253) - 46,8(487 - 381)}{2716 - 381} = 44,7 \frac{\text{КГ}}{\text{С}}$$

$$G_{\text{отб } 7} = \frac{G_{\text{к}} \cdot (h_{\text{ПНД-1}}^{\text{ВЫХ}} - h_{\text{ПНД-1}}^{\text{ВХ}}) - (G_{\text{отб } 5} + G_{\text{отб } 6})(h_{\text{ПНД-2}}^{\text{ДР}} - h_{\text{ПНД-1}}^{\text{ДР}})}{h_{\text{отб } 7} - h_{\text{ПНД-1}}^{\text{ДР}}}$$

$$G_{\text{отб } 7} = \frac{1361 \cdot (253 - 145) - (46,8 + 44,7)(381 - 276)}{2594 - 276} = 42,9 \frac{\text{КГ}}{\text{С}}$$

$$G_{\text{С}}^{\text{ВЫХ}} = G_{\text{ПВ}} - G_{\text{ПП-1}} - G_{\text{ПП-2}} - G_{\text{отб } 1} - G_{\text{отб } 2} - G_{\text{отб } 3} - G_{\text{отб } 4} - G_{\text{отб } 5} - G_{\text{отб } 6} - G_{\text{отб } 7} - G_{\text{ПСВ-1}} - G_{\text{ПСВ-2}} - G_{\text{С}} = 1047 \frac{\text{КГ}}{\text{С}}$$

Рассмотрим перегрев пара в ПП-1

$$G_{\text{С}}^{\text{ВЫХ}} (h_{\text{ПП-1}}^{\text{ВЫХ}} - h_{\text{ПП-1}}^{\text{ВХ}}) = G_{\text{ПП-1}} (h_7 - h_{\text{ПП-1}}^{\text{ДР}})$$

$$G_{\text{ПП-1}} = \frac{G_{\text{С}}^{\text{ВЫХ}} (h_{\text{ПП-1}}^{\text{ВЫХ}} - h_{\text{ПП-1}}^{\text{ВХ}})}{h_{\text{отб } 2} - h_{\text{ПП-1}}^{\text{ДР}}}$$

$$h_{\text{ПП-1}}^{\text{ВХ}} = f(P_{\text{ЦВД}}^{\text{ВЫХ}} - \Delta P_{\text{С}}; t_{\text{ПП-1}}^{\text{ВХ}}) = 2740 \frac{\text{КДЖ}}{\text{КГ}}$$

Примем, что подогрев пара в ПП-1 и ПП-2 одинаковый, тогда энтальпию на выходе из ПП-1 можно определить по средней температуре между входом и выходом в СПП:

$$P_{\text{ПП-1}}^{\text{ВЫХ}} = P_{\text{ПП-1}}^{\text{ВХ}} - \Delta P_{\text{ПП}} = 0,43 - 0,006 = 0,424 \text{ МПа}$$

$$P_{\text{ПП-2}}^{\text{ВЫХ}} = P_{\text{ПП-1}}^{\text{ВЫХ}} - \Delta P_{\text{ПП}} = 0,42 - 0,006 = 0,418 \text{ МПа}$$

$$t_{\text{ПП-1}}^{\text{ВЫХ}} = \frac{t_{\text{ПП-1}}^{\text{ВХ}} + t_{\text{ПП-2}}^{\text{ВЫХ}}}{2} = \frac{146 + 263}{2} = 205 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$h_{\text{ПП-1}}^{\text{ВЫХ}} = f(P_{\text{ПП-1}}^{\text{ВЫХ}}; t_{\text{ПП-1}}^{\text{ВЫХ}}) = f(0,42 \text{ МПа}; 205 \text{ } ^\circ\text{C}) = 2871 \frac{\text{КДЖ}}{\text{КГ}}$$

$$h_{\text{ПП-2}}^{\text{ВЫХ}} = f(P_{\text{ПП-2}}^{\text{ВЫХ}}; t_{\text{ПП-2}}^{\text{ВЫХ}}) = f(0,41 \text{ МПа}; 263 \text{ }^\circ\text{C}) = 2991 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

$$G_{\text{ПП-1}} = \frac{G_{\text{С}}^{\text{ВЫХ}}(h_{\text{ПП-1}}^{\text{ВЫХ}} - h_{\text{ПП-1}}^{\text{ВХ}})}{h_{\text{отб 2}} - h_{\text{ПП-1}}^{\text{ДР}}} = \frac{1193(2871 - 2742)}{2596 - 1229} = 98,8 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

Рассмотрим перегрев пара в ПП-2

$$G_{\text{С}}^{\text{ВЫХ}}(h_{\text{ПП-2}}^{\text{ВЫХ}} - h_{\text{ПП-1}}^{\text{ВЫХ}}) = G_{\text{ПП-2}}(h_0 - h_{\text{ПП-2}}^{\text{ДР}})$$

$$G_{\text{ПП-2}} = \frac{G_{\text{С}}^{\text{ВЫХ}}(h_{\text{ПП-2}}^{\text{ВЫХ}} - h_{\text{ПП-1}}^{\text{ВЫХ}})}{h_0 - h_{\text{ПП-2}}^{\text{ДР}}} = \frac{583(2991 - 2872)}{2774 - 1262} = 83 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

Так как расходы пара на ПП-1 и ПП-2 отличаются меньше, чем на 0,5% от полученных значений в первом приближении, то расчет можно считать окончанным.

Значения расходов пара на элементы СПП в третьем приближении:

$$G_{\text{ПП-1}} = 101 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

$$G_{\text{ПП-2}} = 117 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

Запишем уравнение материального баланса для точки смешения ТС-4 после ПВД-2:

$$G_{\text{Д}}^{\text{ВЫХ}} h_{\text{ПВД-2}}^{\text{ВЫХ}} + G_{\text{ПП-2}} h_{\text{ПП-2}}^{\text{ДР}} = G_{\text{ПВ}} h_{\text{ПВ}}$$

$$G_{\text{Д}}^{\text{ВЫХ}} = G_{\text{ПВ}} - G_{\text{ПП-2}}$$

$$h_{\text{ПВД-2}}^{\text{ВЫХ}} = \frac{G_{\text{ПВ}} h_{\text{ПВ}} - G_{\text{ПП-2}} h_{\text{ПП-2}}^{\text{ДР}}}{G_{\text{ПВ}} - G_{\text{ПП-2}}}$$

$$h_{\text{ПП-2}}^{\text{ДР}} = f(P_0; t_0^s) = 1262 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

$$h_{\text{ПВД-2}}^{\text{ВЫХ}} = \frac{G_{\text{ПВ}} h_{\text{ПВ}} - G_{\text{ПП-2}} h_{\text{ПП-2}}^{\text{ДР}}}{G_{\text{ПВ}} - G_{\text{ПП-2}}} = \frac{1939 \cdot 977 - 83 \cdot 1262}{1939 - 83} = 965 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

таким образом подогрев воды в ТС-4:

$$\Delta t_{\text{ТС-4}} = t(p_{\text{ПВД-2}}^{\text{ВЫХ}}, h_{\text{ПВД-3}}^{\text{ВХ}}) - t(p_{\text{ПВД-2}}^{\text{ВЫХ}}, h_{\text{ПВД-2}}^{\text{ВЫХ}}) = 5,1 \text{ }^\circ\text{C}$$

Таким образом, изменилась температура на выходе из ПВД-2, а, следовательно, и подогрев в ПВД-2:

$$t_{\text{ПВД-2}}^{\text{ВЫХ}} = f(h_{\text{ПВД-2}}^{\text{ВЫХ}}; P_{\text{ПВД-2}}^{\text{ВЫХ}}) = 224,2 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_{\text{ПВД-2}} = t_{\text{ПВД-2}}^{\text{ВЫХ}} - t_{\text{ПВД-2}}^{\text{ВХ}} = 224,2 - 203,2 = 21 \text{ } ^\circ\text{C}$$

После пересчета всех параметров по уточненным значениям были получены результаты, представленные в таблице 7. Расхождение расходов пара на всех участках меньше, чем 0,5 %, следовательно, можно считать итерации оконченными, а результаты считать верными с необходимой точностью.

Рассмотрим материальный баланс для конденсатора

$$\begin{aligned} G_{\text{ОХЛ}} \cdot C_{\text{р ОХЛ}}^{\text{ВХ}} \cdot t_{\text{ВХ.ОХЛ}} + G_{\text{ЦВД}}^{\text{ВЫХ}} \cdot h_{\text{КД}}^{\text{ВХ}} + (G_{\text{Отб 5}} + G_{\text{Отб 6}} + G_{\text{Отб 7}})(h_{\text{ПВД-1}}^{\text{ДР}})_{\text{КД}} \\ = G_{\text{ОХЛ}} \cdot C_{\text{р ОХЛ}}^{\text{ВЫХ}} \cdot t_{\text{ВЫХ.ОХЛ}} + G_{\text{КД}} \cdot h_{\text{КД}}^{\text{ВЫХ}} \\ = \frac{G_{\text{ЦВД}}^{\text{ВЫХ}} \cdot h_{\text{К}}^{\text{ВХ}} + (G_{\text{Отб 3}} + G_{\text{Отб 4}} + G_{\text{Отб 5}} + G_{\text{Отб 6}} + G_{\text{Отб 7}})(h_{\text{ПВД-1}}^{\text{ДР}})_{\text{КД}} + (G_{\text{ПСВ 1}} + G_{\text{ПСВ 2}})(h_{\text{ПВД-1}}^{\text{ДР}})_{\text{КД}} - G_{\text{КД}} \cdot h_{\text{КД}}^{\text{ВЫХ}}}{h_{\text{ВЫХ.ОХЛ}} - h_{\text{ВХ.ОХЛ}}} \\ h_{\text{К}}^{\text{ВЫХ}} = f(p_{\text{КД}}; x) = f(0,00475 \text{ МПа}; 0) = 134 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \\ G_{\text{ОХЛ}} = \frac{912 \cdot 2408 + (46,8 + 44,7 + 42,9) \cdot 2622 - 1047 \cdot 121}{93 - 64} = 71510 \frac{\text{кг}}{\text{с}} \\ m = \frac{G_{\text{ОХЛ}}}{G_{\text{К}}} = \frac{71510}{1047} = 68 \end{aligned}$$

Общая проверка

$$\begin{aligned} G_{\text{ПВ}} = G_{\text{Отб 1}} + G_{\text{Отб 2}} + G_{\text{Отб 3}} + G_{\text{Отб 4}} + G_{\text{Отб 5}} + G_{\text{Отб 6}} + G_{\text{Отб 7}} + G_{\text{ПП-1}} + \\ G_{\text{ПП-2}} + G_{\text{ПСВ1}} + G_{\text{ПСВ2}} + G_{\text{ЦВД}}^{\text{ВЫХ}} \\ 2169,7 = 116,6 + 85,7 + 44,4 + 106,1 + 70,4 + 46 + 45 + 43 + 99 + 83 + 58 + 69 + 1203 \end{aligned}$$

Проверка для ТС

$$\Delta t_{\text{ТС-4}} = t(p_{\text{ПП-1}}^{\text{ВЫХ}}, h_{\text{ПП-2}}^{\text{ВХ}}) - t(p_{\text{ПП-1}}^{\text{ВЫХ}}, h_{\text{ПП-1}}^{\text{ВЫХ}}) = 5,1 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_{\text{ТС-3}} = t(p_{\text{ПВД-2}}^{\text{ВЫХ}}, h_{\text{ПВД-3}}^{\text{ВХ}}) - t(p_{\text{ПВД-2}}^{\text{ВЫХ}}, h_{\text{ПВД-2}}^{\text{ВЫХ}}) = 2,6 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_{\text{ТС-2}} = t(p_{\text{ПВД-3}}^{\text{ВЫХ}}, h_{\text{ПВД-4}}^{\text{ВХ}}) - t(p_{\text{ПВД-3}}^{\text{ВЫХ}}, h_{\text{ПВД-3}}^{\text{ВЫХ}}) = 4,9 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_{\text{ТС-1}} = t(p_{\text{ПНД-4}}^{\text{ВЫХ}}, h_{\text{ПНД-5}}^{\text{ВХ}}) - t(p_{\text{ПНД-4}}^{\text{ВЫХ}}, h_{\text{ПНД-4}}^{\text{ВЫХ}}) = 1,8 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Результаты расчетов расходов среды по элементам схемы приведены в виде таблицы 2.8.

Таблица 2.8

Расходы греющей среды на каждый элемент

Величина	Единицы измерения	Значение
$G_{\text{ПВ}}$	кг/с	2169,7
$G_{\text{Отб 1}}$	кг/с	116,6
$G_{\text{Отб 2}}$	кг/с	85,7
$G_{\text{Отб д}}$	кг/с	44,4
$G_{\text{Отб 3}}$	кг/с	106,1
$G_{\text{Отб 4}}$	кг/с	70,4
$G_{\text{Отб 5}}$	кг/с	46
$G_{\text{Отб 6}}$	кг/с	45
$G_{\text{Отб 7}}$	кг/с	43
$G_{\text{ПП-1}}$	кг/с	99
$G_{\text{ПП-2}}$	кг/с	83
$G_{\text{ПСВ 1}}$	кг/с	58
$G_{\text{ПСВ 2}}$	кг/с	69
$G_{\text{ЦВД}}^{\text{ВЫХ}}$	кг/с	1203
$G_{\text{С}}^{\text{ДР}}$	кг/с	202
$G_{\text{ЦНД}}^{\text{ВЫХ}}$	кг/с	912
$G_{\text{ОХЛ}}$	кг/с	71510

2.8. Расчет мощности турбины

1. Расчет внутренних мощностей отсеков

Внутренняя мощность отсека определяется по формуле:

$$N_{\text{отс}} = G_{\text{отс}} (h_{\text{отс}}^{\text{ВХ}} - h_{\text{отс}}^{\text{ВЫХ}})$$

Результаты расчета внутренних мощностей для каждого отсека представлены в виде таблицы 2.9.

Таблица 2.9

Внутренняя мощность отсеков

Начальная точка	Конечная точка	$h_{\text{вхотс}}$ кДж/кг	$h_{\text{выхотс}}$ кДж/кг	$G_{\text{отс}}, \frac{\text{кг}}{\text{с}}$	$N_{\text{отс}}, \text{МВт}$
Вход ЦВД	Отбор 1	2774	2657	1856	218
Отбор 1	Отбор 2	2657	2596	1751	106
Отбор 2	Отбор д	2596	2516	1580	127
Отбор д	Отбор 3	2516	2483	1541	51
Отбор 3	Отбор 4	2483	2398	1379	116
Вход ЦНД	Отбор 5	2991	2851	1249	174
Отбор 5	Отбор 6	2851	2716	1202	162
Отбор 6	Отбор 7	2716	2594	1158	141
Отбор 7	Конденсатор	2594	2408	1115	208

$$N_{\text{расч}} = \eta_{\text{мех}} \eta_{\Gamma} \sum_{i=1}^8 N_{\text{отс } i} = 1271 \text{ МВт}$$

где $\eta_{\text{мех}} = 0,99$, $\eta_{\Gamma} = 0,985$

2.9. Расход электроэнергии на собственные нужды

1. Мощность конденсатного насоса

$$N_{\text{кн}} = \frac{G_{\text{ок}} \Delta P_{\text{кн}} \overline{\vartheta}_{\text{к}}}{\eta_{\text{кн}} \eta_{\text{эл.пр.}}} = \frac{1047 \cdot 2,8 \cdot 0,001}{0,77 \cdot 0,85} = 4,8 \text{ МВт}$$

где $\eta_{\text{кн}} = 0,77$ - КПД конденсатного насоса, $\eta_{\text{эл.пр.}} = 0,85$ - КПД электропривода, $\Delta P_{\text{кн}}$ - перепад давлений, осуществляемый конденсатным насосом, $G_{\text{ок}}$ - расход основного конденсата, прокачиваемого конденсатным насосом, $\bar{\vartheta}_k$ - средний удельный объем.

2. Мощность питательного насоса

$$N_{\text{пн}} = \frac{G_{\text{выхд}} \Delta P_{\text{пн}} \bar{\vartheta}_{\text{пв}}}{\eta_{\text{пн}} \eta_{\text{эл.пр.}}} = \frac{1856 \cdot 9,3 \cdot 0,0011}{0,81 \cdot 0,85} = 25,5 \text{ МВт}$$

где $\eta_{\text{кн}} = 0,81$ - КПД питательного насоса, $\eta_{\text{эл.пр.}} = 0,85$ - КПД электропривода, $\Delta P_{\text{пн}}$ - перепад давлений, осуществляемый питательным насосом, $G_{\text{пв}}$ - расход питательной воды, прокачиваемой питательным насосом, $\bar{\vartheta}_k$ - средний удельный объем.

3. Мощность главного циркуляционного насоса

$$N_{\text{гцн}} = \frac{G_{\text{т}} \Delta P_{\text{гцн}} \bar{\vartheta}_{\text{т}}}{\eta_{\text{гцн}} \eta_{\text{эл.пр.}}} = \frac{2031 \cdot 0,645 \cdot 0,0014}{0,85 \cdot 0,85} = 25,7 \text{ МВт}$$

где $\eta_{\text{гцн}} = 0,85$ - КПД главного циркуляционного насоса, $\eta_{\text{эл.пр.}} = 0,85$ - КПД электропривода, $\Delta P_{\text{гцн}}$ - перепад давлений, осуществляемый ГЦН, $G_{\text{т}}$ - расход теплоносителя первого контура, прокачиваемого ГЦН, $\bar{\vartheta}_k$ - средний удельный объем.

4. Мощность циркуляционного насоса

$$N_{\text{цн}} = \frac{G_{\text{охл}} \Delta H g}{\eta_{\text{цн}} \eta_{\text{эл.пр.}}} = \frac{7151 \cdot 20 \cdot 9,8}{0,77 \cdot 0,85} = 20,7 \text{ МВт}$$

где $\eta_{\text{цн}} = 0,77$ - КПД г циркуляционного насоса, $\eta_{\text{эл.пр.}} = 0,85$ - КПД электропривода, ΔH - разность высот, $G_{\text{охл}}$ - расход охлаждающей воды, прокачиваемого ЦН.

Мощность дренажных насосов была рассчитана по аналогичной методике и оказалось, что она мала, значит можно пренебречь ею.

2.10. Показатели тепловой экономичности

1. Расход теплоты на ТУ

$$Q_{\text{э}} = Q_0 - Q_{\text{тф}} = -290 = 3194 \text{ МВт}$$

2. Электрический КПД нетто

$$\eta_{\text{э}}^{\text{нетт}} = \frac{N_{\text{эл}}^{\text{расч}} - N_{\text{сн}}}{Q_{\text{э}}} = \frac{1271 - 76,7}{3194} 100 = 37,4 \%$$

3. Относительное расхождение заданной и расчетной мощности ТУ

$$\Delta = \frac{N_{\text{эл}}^{\text{расч}} - N_{\text{сн}} - N_{\text{эл}}}{N_{\text{эл}}} = \frac{1271 - 76,7 - 1200}{1200} 100 = 0,4 \%$$

Так как относительное расхождение заданной и расчетной электрической мощности турбоустановки меньше 0,5%, следовательно, расчет можно считать завершенным.



Вывод

- В данной работе проектировалась установка мощностью 1200 МВт и КПД 33 %.
- В результате итерационного расчета энергоблока АЭС с реактором типа ВВЭР получены: (с КПД = 37,4%).
- Основные параметры контура рабочего тела: давление и температура генерируемого пара в горизонтальном парогенераторе: 6,5 МПа и 280.9 °С.
- Число регенеративных подогревателей: 5 подогревателя низкого давления и 2 подогревателя высокого давления, а также давление в отборах (см. табл.
- NS-диаграмма процесса расширения пара в турбине (см. рис. 1).
- T-Q диаграмма ПГ (см. рис. 2).
- Расходы в элементах схемы (см. табл. 11).
- Расход питательной воды составляет 2169,7 кг/с, расход теплоносителя— 22843,5 кг/с.
- Электрическая мощность энергоблока – 1279,69 МВт.
- КПД станции нетто – 37,4%.

ГЛАВА 3. ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА: ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ

Теплогидравлический расчет реактора представляет собой одно из наиболее важных звеньев в техническом обосновании работоспособности ядерной энергетической установки.

Его целью является определение характеристик, необходимых для оценки теплотехнической надежности активной зоны, проведение нейтронно-физического и прочностных расчетов реактора, выбор оборудования первого контура установки.

3.1. Исходные данные

Исходные данные для расчета представлены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Исходные для теплогидравлического расчета ядерного реактора

№	Параметр, размерность	Значение
1	Q_p , МВт	3250
2	P_1 , МПа	16
3	$t_{\text{вых}}$, °С	326
4	ΔT_1 , К	30
5	$d_{\text{ТВЭЛ}}$, мм	9,3
6	ТОПЛИВО	UO ₂
7	Материал оболочки	цирконий
8	$\delta_{\text{ст}}$, мм	0,72
9	$\delta_{\text{газ}}$, мм	0,07
10	$n_{\text{ТВЭЛ}}$	331
11	Тип решетки	треугольная
12	Шаг твэла, мм	12,75
13	Расстояние между гранями, мм	4,1
14	$m = H_{\text{аз}}/D_{\text{аз}}$	1,14

3.2. Расчет геометрических характеристик

1) Определим число рядов:

$$n_{\text{рядов}} = \sqrt{\frac{n_{\text{ТВЭЛ}} - 1}{0,75} + 1} = \sqrt{\frac{331 - 1}{0,75} + 1} = 21$$

2) Определим диаметр блока горючего:

$$d_1 = d_{\text{ТВЭЛ}} - 2 \cdot (\delta_{\text{ст}} + \delta_{\text{заз}}) = 9,3 - 2 \cdot (0,72 + 0,07) = 7,72 \text{ мм}$$

3) Определим расстояние от кожуха до 1-го ряда:

$$a_1 = 0,825 \cdot (a - d_{\text{ТВЭЛ}}) = 0,825 \cdot (12,75 - 9,3) = 2,84 \text{ мм}$$

4) Определим размер кассеты "под ключ":

$$\begin{aligned} S_k &= \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot a \cdot (n_{\text{рядов}} - 1) + 2 \cdot (a_1 + \delta_{\text{кас}}) + d_{\text{ТВЭЛ}} \\ &= \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 12,75 \cdot (21 - 1) + 2 \cdot (2,84 + 1,5) + 9,3 = 238,82 \text{ мм} \end{aligned}$$

5) Определим живое сечение кассеты:

$$\begin{aligned} F_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{кас}} &= 0,866 \cdot (S_k - 2 \cdot \delta_{\text{кас}})^2 - \frac{\pi \cdot d_{\text{ТВЭЛ}}^2}{4} \cdot n_{\text{ТВЭЛ}} \\ &= 0,866 \cdot (238,82 - 2 \cdot 1,5)^2 - \frac{\pi \cdot 9,3^2}{4} \cdot 331 = 25678,3 \text{ мм}^2 \end{aligned}$$

6) Определим площадь в кассете, занятую топливом:

$$F_{\text{T}}^{\text{кас}} = \frac{\pi \cdot d_1^2}{4} \cdot n_{\text{ТВЭЛ}} = \frac{\pi \cdot 7,72^2}{4} \cdot 331 = 15493,6 \text{ мм}^2$$

7) Определим площадь кассеты, занятую конструкционным материалом:

$$\begin{aligned} F_{\text{KM}}^{\text{кас}} &= \frac{\pi}{4} \cdot (d_{\text{ТВЭЛ}}^2 - (d_1 + 2 \cdot \delta_{\text{заз}})^2) \cdot n_{\text{ТВЭЛ}} + 2\sqrt{3} \cdot \delta_{\text{кас}} \cdot (S_k - \delta_{\text{кас}}) \\ &= \frac{\pi}{4} \cdot (9,3^2 - (7,72 + 2 \cdot 0,07)^2) \cdot 331 + 2\sqrt{3} \cdot 1,5 \cdot (238,82 - 1,5) = 7657,08 \text{ мм}^2 \end{aligned}$$

8) Определим площадь кассеты, занятую газовым зазором:

$$\begin{aligned} F_3^{\text{кас}} &= \frac{\pi}{4} \cdot (d_{\text{ТВЭЛ}} - (2 \cdot \delta_{\text{ст}}))^2 - d_1^2) \cdot n_{\text{ТВЭЛ}} \\ &= \frac{\pi}{4} \cdot ((9,3 - (2 \cdot 0,72))^2 - 7,72^2) \cdot 331 = 567,04 \text{ мм}^2 \end{aligned}$$

9) Определим общую площадь кассеты:

$$F_{\text{кас}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot S_k^2 = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 238,82^2 = 49397,5 \text{ мм}^2$$

Проверка:

$$F_{\text{кас}} = F_{H_2O}^{\text{кас}} + F_T^{\text{кас}} + F_{\text{км}}^{\text{кас}} + F_3^{\text{кас}} = 25678,3 + 15493,6 + 7657,08 + 567,08 = 49397,5 \text{ мм}^2$$

По результатам проверки данные сошлись, а значит можно продолжать вычисления с их использованием.

10) Определим гидравлический (омываемый) периметр кассеты:

$$P_{\Gamma} = \pi \cdot d_{\text{ТВЭЛ}} \cdot n_{\text{ТВЭЛ}} + 2 \cdot \sqrt{3} \cdot (S_{\text{к}} - 2 \cdot \delta_{\text{кас}}) \\ = \pi \cdot 9,3 \cdot 331 + 2 \cdot \sqrt{3} \cdot (238,82 - 2 \cdot 1,5) = 10487,7 \text{ мм}$$

Теперь посчитаем гидравлический диаметр:

$$D_{\Gamma} = \frac{4 \cdot F_{H_2O}^{\text{кас}}}{P_{\Gamma}} = \frac{4 \cdot 25678,3}{10487,7} = 9,79 \text{ мм}$$

11) Определим тепловой (обогреваемый) периметр кассеты:

$$P_T = \pi \cdot d_{\text{ТВЭЛ}} \cdot n_{\text{ТВЭЛ}} = \pi \cdot 9,3 \cdot 331 = 9665,86 \text{ мм}$$

Теперь посчитаем тепловой диаметр:

$$D_T = \frac{4 \cdot F_{H_2O}^{\text{кас}}}{P_T} = \frac{4 \cdot 25678,3}{9665,86} = 10,62 \text{ мм}$$

12) Определим площадь ячейки реактора:

$$F_{\text{яч}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot (S_{\text{к}} + \delta_{\text{яч}})^2 = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot (238,82 + 4,1)^2 = 51108 \text{ мм}^2$$

13) Определим шаг установки ТВС:

$$t_{\text{ТВС}} = S_{\text{к}} + \delta_{\text{яч}} = 238,82 + 4,1 = 242,92 \text{ мм}$$

3.3. Конструктивный расчет

1) Зададим три значения скорости теплоносителя:

$$w_1=3,5 \text{ м/с}; w_2=4,5 \text{ м/с}; w_3=5 \text{ м/с}.$$

2) Определим полное живое сечение всех ТВС в АЗ:

Для этого находим нужные нам параметры воды:

Таблица 3.2

Параметры и свойства теплоносителя

$T_{\text{ВХ}}, ^\circ\text{C}$	296
$T_{\text{ВЫХ}}, ^\circ\text{C}$	326
$I_{\text{ВХ}}, \text{КДж/Кг}$	1310,3
$I_{\text{ВЫХ}}, \text{КДж/Кг}$	1483,1
$\rho_{\text{ВХ}}, \text{Кг/м}^3$	737,5
$\rho_{\text{ВЫХ}}, \text{Кг/м}^3$	668,1
$\bar{\rho}(16 \text{ МПа}; \frac{326+296}{2} = 311 ^\circ\text{C}), \text{Кг/м}^3$	705,9

Затем посчитаем расход:

$$G_p = \frac{Q_p}{I_{\text{ВЫХ}} - I_{\text{ВХ}}} = \frac{3250 \cdot 10^3}{(1483,1 - 1310,3)} = 18807,9 \frac{\text{Кг}}{\text{с}}$$

Тогда наше полное живое сечение ТВС в АЗ:

$$F_{\text{H}_2\text{O} 1}^\Sigma = \frac{k_{\text{пр}} \cdot G_p}{\bar{\rho} \cdot \bar{w}} = \frac{0,97 \cdot 18807,9}{705,9 \cdot 3,5} = 7,38 \text{ м}^2$$

Аналогично для двух других скоростей:

$$F_{\text{H}_2\text{O} 2}^\Sigma = 5,74 \text{ м}^2$$

$$F_{\text{H}_2\text{O} 3}^\Sigma = 5,16 \text{ м}^2$$

3) Определим число рабочих кассет в АЗ:

$$n_{k1} = \frac{F_{\text{H}_2\text{O}}^\Sigma}{F_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{кас}}} = \frac{7,38 \cdot 10^6}{25678,3} = 287$$

$$n_{k2} = 224$$

$$n_{k3} = 201$$

4) Определим площадь поперечного сечения в АЗ:

$$F_{аз1} = n_{k1} \cdot F_{яч} = 287 \cdot \frac{51108}{10^6} = 14,69 \text{ м}^2$$

$$F_{аз2} = 11,43 \text{ м}^2$$

$$F_{аз3} = 10,28 \text{ м}^2$$

5) Определим диаметр АЗ:

$$D_{аз1} = 2 \cdot \sqrt{\frac{F_{аз1}}{\pi}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{14,69}{\pi}} = 4,32 \text{ м}$$

$$D_{аз2} = 3,81 \text{ м}$$

$$D_{аз3} = 3,61 \text{ м}$$

6) Определим высоту АЗ:

$$H_{аз1} = m \cdot D_{аз1} = 0,9 \cdot 4,32 = 3,89 \text{ м}$$

$$H_{аз2} = 3,43 \text{ м}$$

$$H_{аз3} = 3,25 \text{ м}$$

7) Определим объем АЗ:

$$V_{аз1} = \frac{\pi}{4} \cdot D_{аз1}^2 \cdot H_{аз1} = \frac{\pi}{4} \cdot 4,32^2 \cdot 3,89 = 57,21 \text{ м}^3$$

$$V_{аз2} = 39,24 \text{ м}^3$$

$$V_{аз3} = 33,51 \text{ м}^3$$

8) Определим среднюю удельную энергонапряженность АЗ:

$$q_{аз1} = \frac{Q_p}{V_{аз1}} = \frac{3250}{57,21} = 56,8 \frac{\text{МВт}}{\text{м}^3}$$

$$q_{аз2} = 82,8 \frac{\text{МВт}}{\text{м}^3}$$

$$q_{аз3} = 96,9 \frac{\text{МВт}}{\text{м}^3}$$

9) Определим площадь в АЗ, занятую топливом:

$$F_{т1} = n_{k1} \cdot F_{т}^{\text{кас}} = 287 \cdot 15493,6 \cdot 10^{-6} = 4,45 \text{ м}^2$$

$$F_{т2} = 3,46 \text{ м}^2$$

$$F_{T3} = 3,11 \text{ м}^2$$

10) Определим площадь в АЗ, занятую конструкционным материалом:

$$F_{KM1} = n_{k1} \cdot F_{KM}^{кас} = 287 \cdot 7657,08 \cdot 10^{-6} = 2,20 \text{ м}^2$$

$$F_{KM2} = 1,71 \text{ м}^2$$

$$F_{KM3} = 1,54 \text{ м}^2$$

11) Определим площадь в АЗ, занятую газовым зазором:

$$F_{заз1} = n_{k1} \cdot F_{заз}^{кас} = 287 \cdot 567,04 \cdot 10^{-6} = 0,163 \text{ м}^2$$

$$F_{заз2} = 0,126 \text{ м}^2$$

$$F_{заз3} = 0,114 \text{ м}^2$$

12) Определим площадь в АЗ, занятую водой:

$$\begin{aligned} F_{H_2O 1} &= n_{k1} \cdot (F_{H_2O}^{кас} + (F_{яч} - F_{кас})) \\ &= 287 \cdot (25678,3 + (51108 - 49396,1)) \cdot 10^{-6} = 7,87 \text{ м}^2 \end{aligned}$$

$$F_{H_2O 2} = 6,12 \text{ м}^2$$

$$F_{H_2O 3} = 5,51 \text{ м}^2$$

13) Определим общую площадь АЗ:

$$F_{аз1} = F_{T1} + F_{KM1} + F_{заз1} + F_{H_2O1} = 4,45 + 2,20 + 0,163 + 7,87 = 14,69 \text{ м}^2$$

Проверка:

$$F_{аз1} = n_{k1} \cdot F_{яч} = 287 \cdot 51108 \cdot 10^{-6} = 14,69 \text{ м}^2$$

По результатам проверки данные сошлись, а значит можно продолжать вычисления с их использованием.

Аналогично для двух других скоростей:

$$F_{аз2} = 11,43 \text{ м}^2$$

$$F_{аз3} = 10,28 \text{ м}^2$$

14) Определим водо-топливное соотношение:

$$\omega^*_1 = \frac{F_{H_2O1}}{F_{T1}} = \frac{7,87}{4,45} = 1,76$$

$$\omega^*_2 = 1,76$$

$$\omega^*_3 = 1,76$$

3.4. Расчет неравномерности энерговыделения в АЗ

Для расчета неравномерности необходимо вычислить размеры АЗ с учетом эффективной добавки отражателя.

Отражатель - это конструктивный элемент реактора, окружающий АЗ. Отражатель возвращает часть нейтронов, покидающих АЗ. Тем самым они эффективнее используются. Так же уменьшаются критические размеры реактора.

В качестве отражателя обычно используют замедлитель. В реакторах типа ВВЭР отражателем является слой теплоносителя между обечайкой корпуса и шахтой реактора.

Эффективной добавкой называется то расстояние от границы АЗ, на котором нейтронный поток обращается в 0. Эффективные размеры – диаметр и высота АЗ с учетом эффективной добавки. При расчете неравномерности энерговыделения будем использовать именно их. По высоте реактора зависимость определяется законом синуса, по радиусу – по функции Бесселя первого рода.

1) Посчитаем эффективную добавку:

$$\Delta = 0,072 + (M^2 - 40) \cdot 10^{-3} = 0,072 + (8^2 - 40) \cdot 10^{-3} = 0,096 \text{ м}$$

2) Посчитаем радиус АЗ с учетом отражателя:

$$R'_{аз1} = R_{аз1} + \Delta = 2,16 + 0,096 = 2,25 \text{ м}$$

$$R'_{аз2} = 2,00 \text{ м}$$

$$R'_{аз3} = 1,90 \text{ м}$$

3) Посчитаем высоту АЗ с учетом отражателя:

$$H'_{аз1} = H_{аз1} + 2 \cdot \Delta = 3,89 + 0,096 \cdot 2 = 4,08 \text{ м}$$

$$H'_{аз2} = 3,62 \text{ м}$$

$$H'_{аз3} = 3,44 \text{ м}$$

4) Определим коэффициенты неравномерности:

- по радиусу:

$$k_{r1} = 2,32 \cdot \left(1 + \frac{2\Delta}{R_{аз1} + \Delta}\right)^{-1} = 2,32 \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot 0,096}{2,16 + 0,096}\right)^{-1} = 1,958$$

$$k_{r2} = 1,938$$

$$k_{r3} = 1,929$$

- по высоте:

$$k_{z1} = 1,57 \cdot \left(1 + \frac{2\Delta}{H_{аз1} + 2\Delta}\right)^{-1} = 1,57 \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot 0,096}{3,89 + 2 \cdot 0,096}\right)^{-1} = 1,264$$

$$k_{z2} = 1,258$$

$$k_{z3} = 1,255$$

- по объему: $k_{v1} = k_{z1} \cdot k_{r1} = 1,264 \cdot 1,958 = 2,47$

$$k_{v2} = 2,43$$

$$k_{v3} = 2,42$$

3.5. Гидравлическое профилирование

Под гидравлическим профилированием активной зоны подразумевается перераспределение расхода по радиусу АЗ. Это делается для компенсации неравномерности энерговыделения. В зонах с максимальным его значением может происходить локальное вскипание теплоносителя, поэтому увеличивая местный расход можно добиться того, чтобы энтальпия теплоносителя на выходе не превышала значение насыщения.

- 1) Определим расход через кассету со средним энерговыделением:

$$G_{k1} = \frac{k_{пр} \cdot G_p}{n_{k1}} = \frac{0,97 \cdot 18807,9}{287} = 63,44 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

$$G_{k2} = 81,56 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

$$G_{k3} = 90,63 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

- 2) Определим расход через кассету с максимальным энерговыделением:

$$G_{k1}^{max} = G_{k1} \cdot k_G = 63,44 \cdot 1,95 = 124 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

где $k_G = k_r$ по условию – полное гидравлическое профилирование.

$$G_{k2}^{\max} = 157 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

$$G_{k3}^{\max} = 175 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

3) Определим максимальную скорость теплоносителя:

$$\overline{w}^{\max}_1 = \overline{w}_1 \cdot k_r = 3,5 \cdot 1,958 = 6,85 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$\overline{w}^{\max}_2 = 8,72 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$\overline{w}^{\max}_3 = 9,64 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

3.6. Основные теплогидравлические параметры АЗ

1) Определим удельные тепловые потоки:

- средний, удельный, на единицу длины твэла:

$$\overline{q}_{l1} = \frac{k_{\text{пр}} \cdot Q_p}{H_{\text{аз1}} \cdot n_{k1} \cdot n_T} = \frac{0,97 \cdot 3250 \cdot 10^6}{3,89 \cdot 287 \cdot 331} = 8,50 \cdot 10^3 \frac{\text{Вт}}{\text{м}}$$

$$\overline{q}_{l2} = 12,40 \cdot 10^3 \frac{\text{Вт}}{\text{м}}$$

$$\overline{q}_{l3} = 14,52 \cdot 10^3 \frac{\text{Вт}}{\text{м}}$$

- средний, удельный, на единицу поверхности твэла:

$$\overline{q}_{s1} = \frac{\overline{q}_{l1}}{3,14 \cdot d_{\text{ТВЭЛ}}} = \frac{8,50 \cdot 10^3}{3,14 \cdot 9,3 \cdot 10^{-3}} = 291,1 \cdot 10^3 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$$

$$\overline{q}_{s2} = 424,4 \cdot 10^3 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$$

$$\overline{q}_{s3} = 497,1 \cdot 10^3 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$$

- средний, удельный, на единицу объема твэла:

$$\overline{q}_{v1} = \frac{4 \cdot \overline{q}_{s1}}{d_{\text{ТВЭЛ}}} = \frac{4 \cdot 291,1 \cdot 10^3}{9,3 \cdot 10^{-3}} = 125,2 \cdot 10^6 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^3}$$

$$\overline{q}_{v2} = 182,5 \cdot 10^6 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^3}$$

$$\overline{q}_{v3} = 213,8 \cdot 10^6 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^3}$$

2) Определим максимальные тепловые потоки:

- на единицу длины ТВЭЛа:

$$q_{l1}^{max} = \bar{q}_{l1} \cdot k_{v1} = 8,50 \cdot 10^3 \cdot 2,47 = 21 \cdot 10^3 \frac{\text{Вт}}{\text{м}}$$

$$q_{l2}^{max} = 30,2 \cdot 10^3 \frac{\text{Вт}}{\text{м}}$$

$$q_{l3}^{max} = 35,1 \cdot 10^3 \frac{\text{Вт}}{\text{м}}$$

- на единицу поверхности ТВЭЛа:

$$q_{s1}^{max} = \bar{q}_{s1} \cdot k_{v1} = 291,1 \cdot 10^3 \cdot 2,47 = 721,1 \cdot 10^3 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$$

$$q_{s2}^{max} = 1035,3 \cdot 10^3 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$$

$$q_{s3}^{max} = 1204,2 \cdot 10^3 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$$

- на единицу объема ТВЭЛа:

$$q_{v1}^{max} = \bar{q}_{v1} \cdot k_{v1} = 125,2 \cdot 10^6 \cdot 2,47 = 310,1 \cdot 10^6 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^3}$$

$$q_{v2}^{max} = 445,3 \cdot 10^6 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^3}$$

$$q_{v3}^{max} = 517,9 \cdot 10^6 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^3}$$

3) Определим распределение удельных тепловых потоков по высоте АЗ.

Для этого запишем соответствующие функции.

$$q_{l1}(z) = q_{l1}^{max} \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot z}{H'_{аз1}}\right) = 21 \cdot 10^3 \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot z}{4,40}\right)$$

$$q_{s1}(z) = \frac{q_{l1}(z)}{p_T^{ТВЭЛ}}$$

$$q_{v1}(z) = q_{v1}^{max} \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot z}{H'_{аз1}}\right) = 310,1 \cdot 10^6 \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot z}{4,40}\right);$$

где $p_T^{ТВЭЛ} = \pi \cdot d_{ТВЭЛ} = 3,14 \cdot 9,3 \cdot 10^{-3} = 0,0292 \text{ м}$.

3.7. Распределение температуры теплоносителя по высоте твэла

1) Определение распределения энерговыделения по высоте активной зоны:

$$i_1(z) = i_{\text{ВХ}} + \frac{\Delta i}{2} \cdot \left(1 + \frac{\sin\left(\frac{\pi \cdot z}{H'_{\text{аз1}}}\right)}{\sin\left(\frac{\pi \cdot H}{2 \cdot H'_{\text{аз1}}}\right)} \right) = 1310,3 + \frac{172,8}{2} \cdot \left(1 + \frac{\sin\left(\frac{\pi \cdot z}{4,40}\right)}{\sin\left(\frac{\pi \cdot 4,21}{2 \cdot 4,40}\right)} \right);$$

$$t_{\text{Т/Н}}(z) = f^s(P_1; i_1(z));$$

В таблицах, представленных ниже, соответственно показано распределение удельных тепловых потоков, и также температуры теплоносителя по высоте АЗ для каждой из трех скоростей.

Для построения графиков распределения удельных тепловых потоков по высоте АЗ выбираем следующие значения:

$$Z = \left\{ \frac{-H_{\text{аз1}}}{2}; \frac{-3H_{\text{аз1}}}{8}; \frac{-2H_{\text{аз1}}}{8}; \frac{-H_{\text{аз1}}}{8}; 0; \frac{H_{\text{аз1}}}{8}; \frac{2H_{\text{аз1}}}{8}; \frac{3H_{\text{аз1}}}{8}; \frac{H_{\text{аз1}}}{2} \right\}$$

Таблица 3.3

Результаты расчета температуры т/н при скорости 3,5 м/с

w = 3,5 м/с					
Z, м	$q_l(z), \frac{\text{Вт}}{\text{м}}$	$q_s(z), \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$	$q_v(z), \frac{\text{МВт}}{\text{м}^3}$	$i(z), \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$t_{\text{Т/Н}}(z), ^\circ\text{C}$
1,94	1554	53221	22,87	1483	326
1,45	9127	312598	134,37	1475	324
0,97	15438	528702	227,26	1456	321
0,48	19611	671618	288,70	1428	316
0,00	21069	721561	310,17	1397	311
-0,48	19611	671618	288,70	1365	305
-0,97	15438	528702	227,26	1338	300
-1,45	9127	312598	134,37	1318	298
-1,94	1554	53221	22,87	1310	296

Таблица 3.4

Результаты расчета температуры т/н при скорости 4,5 м/с

w= 4,5 м/с					
Z, м	$q_l(z), \frac{\text{Вт}}{\text{м}}$	$q_s(z), \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$	$q_v(z), \frac{\text{МВт}}{\text{м}^3}$	$i(z), \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$t_{т/н}(z), ^\circ\text{C}$
1,71	2513	86080	37,0	1483	326
1,28	13296	455356	195,7	1475	324
0,85	22261	762374	327,7	1456	321
0,42	28182	965156	414,8	1428	316
0,00	30250	1035978	445,3	1397	311
-0,42	28182	965156	414,8	1365	305
-0,85	22261	762374	327,7	1338	300
-1,28	13296	455356	195,7	1319	298
-1,71	2513	86080	37,0	1310	296

Таблица 3.5

Результаты расчета температуры т/н при скорости 5 м/с

w= 5 м/с					
Z, м	$q_l(z), \frac{\text{Вт}}{\text{м}}$	$q_s(z), \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$	$q_v(z), \frac{\text{МВт}}{\text{м}^3}$	$i(z), \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$t_{т/н}(z), ^\circ\text{C}$
1,62	3072	105220	45,2	1483	326
1,22	15565	533067	229,1	1475	324
0,81	25942	888441	381,9	1455	321
0,40	32792	1123028	482,7	1428	316
0,00	35184	1204936	517,9	1397	311
-0,40	32792	1123028	482,7	1365	305
-0,81	25942	888441	381,9	1338	300
-1,22	15565	533067	229,1	1319	298
-1,62	3072	105220	45,2	1310	296

2) Тепловые нагрузки по высоте кассеты:

Определим критические тепловые нагрузки в координате z

$$q_{кр}(z) = 1,163 \cdot 10^{-3} \cdot 590 \cdot (\bar{\rho} w_{max} 3600)^{0.5} \cdot \Delta t_n^{0.33} \left(\frac{v'' - v'}{v''} \right)^{1.8}$$

где w_{max} – максимальная скорость теплоносителя;

$\bar{\rho} = 705,9 \text{ кг/м}^3$ - средняя плотность теплоносителя, определяемая по средней температуре $\bar{T}_{H_2O} = 310^\circ\text{C}$;

Δt_n – температура недогрева до T_s ;

v' и v'' – удельные объемы на линии насыщения при $P_1 = 16 \text{ МПа}$;

$$v' = 1,709 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$v'' = 9,309 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг};$$

$T_s = 347,4^\circ\text{C}$ – температура насыщения воды при давлении 16 МПа.

$$q_{кр1}(z) = 1,163 \cdot 10^{-3} \cdot 590 \cdot (705,9 \cdot 3,5 \cdot 3600)^{0.5} \cdot (347,4 - T_{Т/Н}(z))^{0.33} \cdot \left(\frac{0.009309 - 0.001709}{0.009309} \right)^{1.8}$$

$$q_{кр2}(z) = 1,163 \cdot 10^{-3} \cdot 590 \cdot (705,9 \cdot 4,5 \cdot 3600)^{0.5} \cdot (347,4 - T_{Т/Н}(z))^{0.33} \cdot \left(\frac{0.009309 - 0.001709}{0.009309} \right)^{1.8}$$

$$q_{кр3}(z) = 1,163 \cdot 10^{-3} \cdot 590 \cdot (705,9 \cdot 5 \cdot 3600)^{0.5} \cdot (347,4 - T_{Т/Н}(z))^{0.33} \cdot \left(\frac{0.00913 - 0.00172}{0.009309} \right)^{1.8}$$

Определим коэффициент запаса до кризиса теплообмена первого рода:

$$n_{зап} = \frac{q_{кр}(z)}{q_s(z)}$$

В таблицах и графиках, представленных ниже, соответственно показано распределение критических тепловых нагрузок и коэффициент запаса до кризиса теплообмена первого рода по высоте АЗ для каждой из трех скоростей.

Распределение критических тепловых нагрузок по высоте АЗ для скорости
3,5 м/с

w= 3,5 м/с				
Z, м	$t_{Т/Н}(z), ^\circ\text{C}$	$q_{кр}(z), \frac{\text{МВт}}{\text{м}^2}$	$q_s(z), \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$	$n_{зап}$
1,94	326	3,90	53221	73,34
1,45	324	4,02	312598	12,86
0,97	321	4,18	528702	7,91
0,48	316	4,43	671618	6,59
0,00	311	4,65	721561	6,44
-0,48	305	4,89	671618	7,28
-0,97	300	5,07	528702	9,59
-1,45	298	5,14	312598	16,45
-1,94	296	5,21	53221	97,94

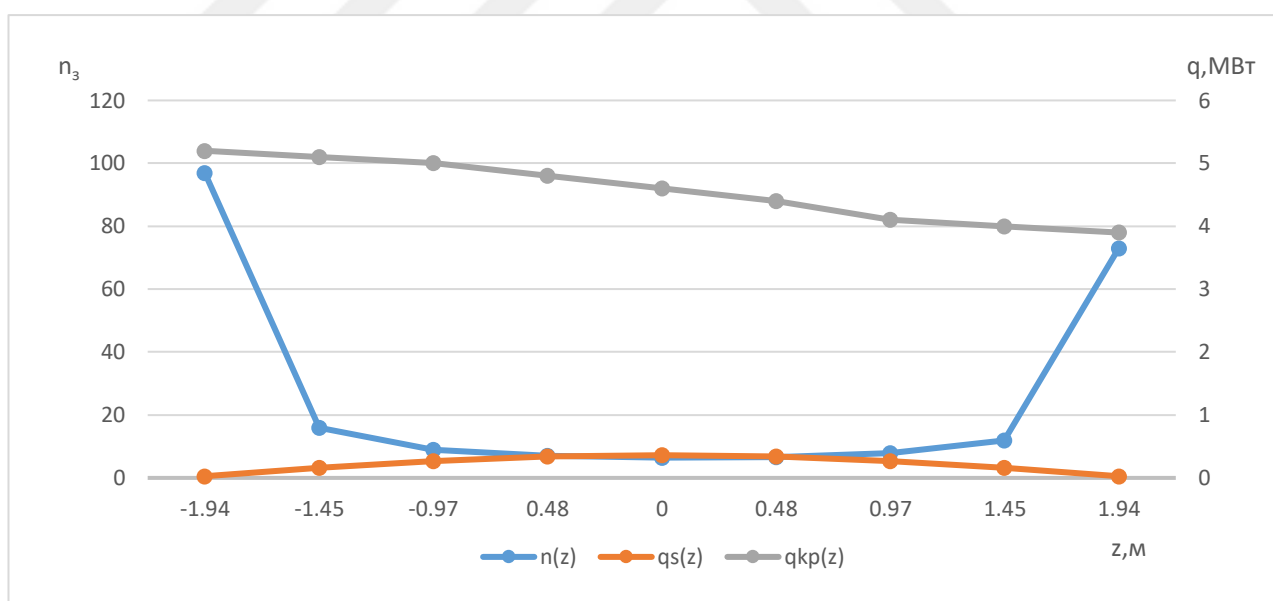


Рис.3.1. Распределение критических тепловых нагрузок по высоте АЗ для скорости 3,5 м/с

Распределение критических тепловых нагрузок по высоте АЗ для скорости
4,5 м/с

w= 4,5 м/с				
Z, м	$t_{Т/Н}(z), ^\circ\text{C}$	$q_{кр}(z), \frac{\text{МВт}}{\text{м}^2}$	$q_s(z), \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$	$n_{зап}$
1,71	326	4,42	86080	51,42
1,28	324	4,55	455356	10,01
0,85	321	4,74	762374	6,22
0,42	316	5,02	965156	5,20
0,00	311	5,27	1035978	5,09
-0,42	305	5,54	965156	5,74
-0,85	300	5,75	762374	7,54
-1,28	298	5,83	455356	12,81
-1,71	296	5,91	86080	68,66

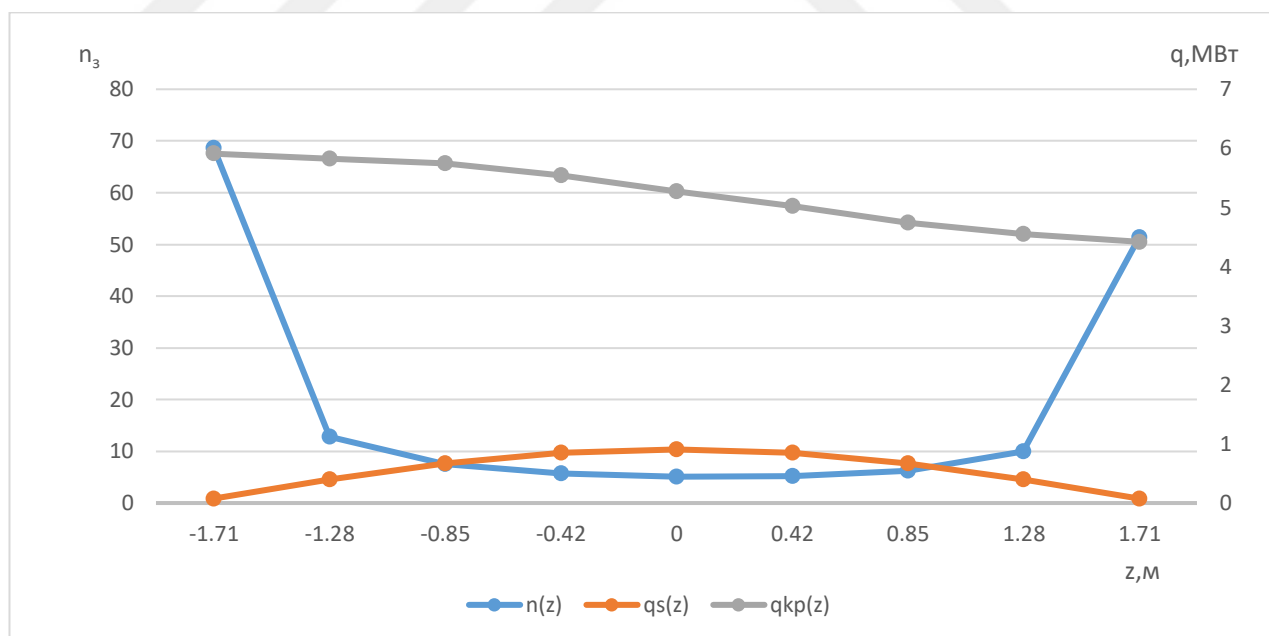


Рис .3.2. Распределение критических тепловых нагрузок по высоте АЗ для скорости 4,5 м/с

Распределение критических тепловых нагрузок по высоте АЗ для скорости
5 м/с

w= 5 м/с				
Z, м	$t_{Т/Н}(z), ^\circ\text{C}$	$q_{кр}(z), \frac{\text{МВт}}{\text{м}^2}$	$q_s(z), \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$	$n_{зап}$
1,62	326	4,66	105220	44,34
1,22	324	4,80	533067	9,01
0,81	321	5,00	888441	5,62
0,40	316	5,29	1123028	4,71
0,00	311	5,55	1204936	4,61
-0,40	305	5,84	1123028	5,20
-0,81	300	6,06	888441	6,82
-1,22	298	6,14	533067	11,53
-1,62	296	6,23	105220	59,21

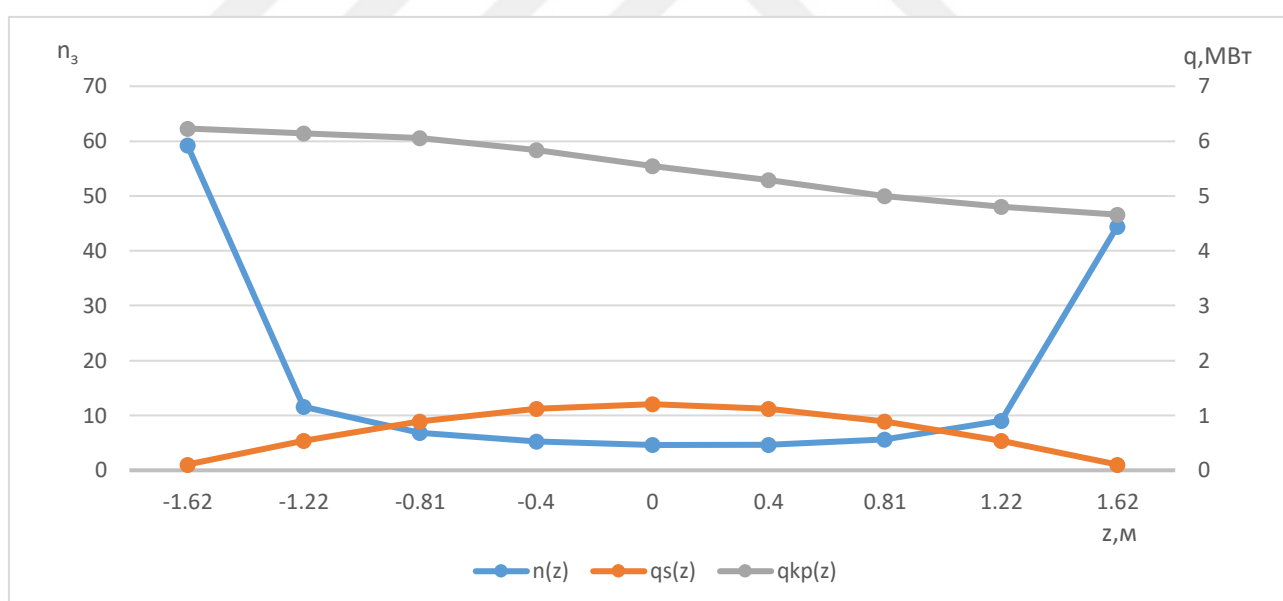


Рис.3.3. Распределение критических тепловых нагрузок по высоте АЗ для скорости 5 м/с

3.8. Распределение температур оболочки твэла

Для надёжной работы реактора на мощности большое значение имеет температура оболочки твэла. Очевидно, что температура внешней стенки твэла не должна превышать определенные значения:

- Температура кипения теплоносителя при давлении 16МПа, $T_s=347,4^\circ \text{C}$.

В реакторе нельзя допускать поверхностное вскипание теплоносителя, так как вода и пар имеют разные нейтронно-физические свойства. Локальное парообразование приведет к колебаниям реактивности.

- Температура начала пароциркониевой реакции $T_{п-ц}=650^\circ \text{C}$.

Пароциркониевая реакция – взаимодействие воды теплоносителя с цирконием оболочки твэлов – начинается только после температуры $T_{п-ц}$. В ее результате выделяется большое количество водорода, который взаимодействует с кислородом воздуха, образуя взрывоопасный гремучий газ, цирконий окисляется – оболочка твэла утончается. Реакция экзотермическая, т.е. самоподдерживается.

- Температура, соответствующая кризису кипения первого рода. Кризис кипения первого рода возникает при переходе из пузырькового или однофазного течения в пленочный режим. Пленка пара на поверхности твэла обладает очень низким значением коэффициента α , из-за чего температура поверхности увеличивается и может произойти расплавление оболочки твэла или начнется пароциркониевая реакция.

- Температура плавления циркония $T_{пл \text{ Zr}}=1400^\circ \text{C}$. Оболочка твэла является вторым барьером безопасности, при ее расплавлении ядерное топливо и продукты деления попадают в теплоноситель первого контура.

Определение температуры наружной поверхности оболочки твэла :

Определение число Рейнольдса

$$Re = \frac{(\rho w).d_r}{\mu}$$

Где ρ - Средняя плотность воды в активной зоне, кг/м^3 ;

$w = w_{\text{max}}$, м/с ;

d_r - гидравлический диаметр кассета, м;

μ - Динамическая вязкость воды. $\mu = f(T_{Т/Н}, P_1)$

Определение число Нусельта для ТВС

$$Nu = (0.032 \cdot \frac{t}{d_2} - 0.0144) \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{\frac{1}{3}}$$

Где t – шаг твэл, м;

d_2 – диаметр твэл, м;

Определим коэффициент теплоотдачи

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{d_r}$$

Где λ - коэффициент теплопроводности воды. $\lambda = f(T_{Т/Н}, P_1)$

d_r - гидравлический диаметр кассета, м;

Функция распределения температуры наружной поверхности твэла

$$T_{об}^H(z) = T_{Т/Н}(z) + q_l(z) \cdot R_\alpha$$

Где $R_\alpha = \frac{1}{\pi \cdot d_2 \cdot \alpha}$ - термическое сопротивление теплоотдачи, м.К/ Вт;

d_2 – диаметр твэл, м;

Определим максимальную температуру наружной поверхности твэла:

$$\begin{aligned} (T_{об1}^{нар})_{max} &= T_{вх} + \frac{\Delta T}{2} + q_{l1}^{max} R_{\alpha 1} \sqrt{1 + \left(\frac{\Delta T}{2 q_{l1}^{max} R_{\alpha 1}} \right) \cdot \frac{1}{\sin^2 \left(\frac{\pi H_{\alpha 31}}{2 H_{\alpha 31}} \right)}} \\ &= 296 + \frac{30}{2} + 21 \cdot 10^3 \cdot 0,00107 \sqrt{1 + \left(\frac{30}{2 \cdot 21 \cdot 10^3 \cdot 1,07 \cdot 10^{-3}} \right) \cdot \frac{1}{\sin^2 \left(\frac{\pi \cdot 3,89}{2 \cdot 4,08} \right)}} = 340^\circ\text{C} \end{aligned}$$

$$(T_{об2}^{нар})_{max} = 342,1^\circ\text{C}$$

$$(T_{об3}^{нар})_{max} = 343,2^\circ\text{C}$$

Поскольку $T_s = 347,4^\circ\text{C}$, то пристеночного кипения нет.

Определим высоту, соответствующую максимальной температуре:

$$z_1(T_{об max1}^{нар}) = \frac{H'_{\alpha 31}}{\pi} \cdot \arctg \frac{\Delta T}{2 \cdot \sin \left(\frac{\pi H_{\alpha 31}}{2 H_{\alpha 31}} \right) \cdot q_{l1}^{max} R_{\alpha 1}}$$

$$= \frac{4,08}{\pi} \cdot \operatorname{arctg} \frac{30}{2 \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot 3,89}{2 \cdot 4,08}\right) \cdot 21 \cdot 10^3 \cdot 1,07 \cdot 10^{-3}} = 0,765 \text{ м}$$

$$z_2(T_{об\ max2}^{нар}) = 0,582 \text{ м}$$

$$z_3(T_{об\ max3}^{нар}) = 0,535 \text{ м}$$

В таблицах и графиках, представленных ниже, соответственно показано распределение температуры оболочки ТВЭЛ по высоте для каждой из трех скоростей (для наиболее напряжённой ТВС).



Таблица 3.9

Распределение температуры оболочки ТВЭЛ по высоте для скорости 3,5 м/с

w= 3,5 м/с			
Z, м	$t_{Т/Н}(z), ^\circ\text{C}$	$q_l(z), \frac{\text{Вт}}{\text{м}}$	$T_{об}^{нар}(z), ^\circ\text{C}$
1,94	326	1554	327,6
1,45	324	9127	333,7
0,97	321	15438	337,5
0,48	316	19611	336,9
0,00	311	21069	333,5
-0,48	305	19611	325,9
-0,97	300	15438	316,5
-1,45	298	9127	307,7
-1,94	296	1554	297,6

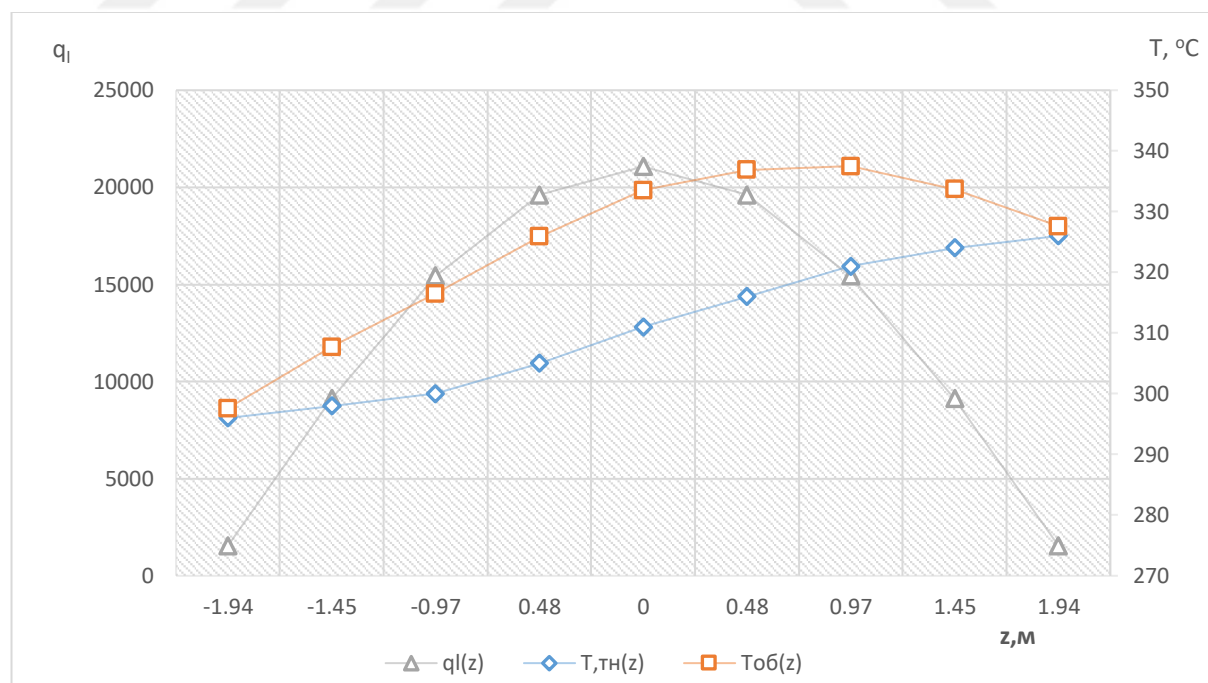


Рис .3.4. Распределение температуры оболочки ТВЭЛ по высоте для скорости 3,5 м/с

Таблица 3.10

Распределение температуры оболочки твэла по высоте для скорости 4,5 м/с

$w = 4,5 \text{ м/с}$			
$Z, \text{ м}$	$t_{\text{Т/Н}}(z), ^\circ\text{C}$	$q_l(z), \frac{\text{Вт}}{\text{м}}$	$T_{\text{об}}^{\text{нар}}(z), ^\circ\text{C}$
1,71	326	2513	328,2
1,28	324	13296	335,9
0,85	321	22261	341,0
0,42	316	28182	341,3
0,00	311	30250	338,2
-0,42	305	28182	330,3
-0,85	300	22261	320,0
-1,28	298	13296	309,9
-1,71	296	2513	298,2

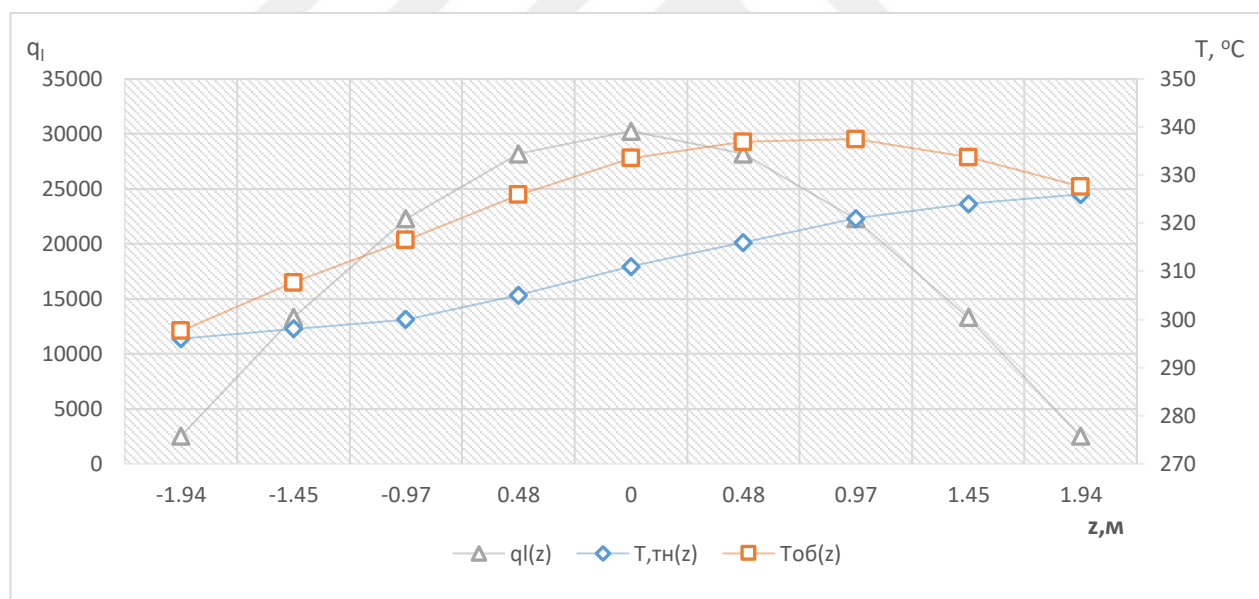


Рис .3.5. Распределение температуры оболочки твэла по высоте для скорости 4,5 м/с

Таблица 3.11

Распределение температуры оболочки твэла по высоте для скорости 5 м/с

w= 5 м/с			
Z, м	$t_{Т/Н}(z), ^\circ\text{C}$	$q_l(z), \frac{\text{Вт}}{\text{м}}$	$T_{об}^{нар}(z), ^\circ\text{C}$
1,62	326	3072	328,4
1,22	324	15565	336,5
0,81	321	25942	341,9
0,40	316	32792	342,4
0,00	311	35184	339,4
-0,40	305	32792	331,4
-0,81	300	25942	320,9
-1,22	298	15565	310,5
-1,62	296	3072	298,4

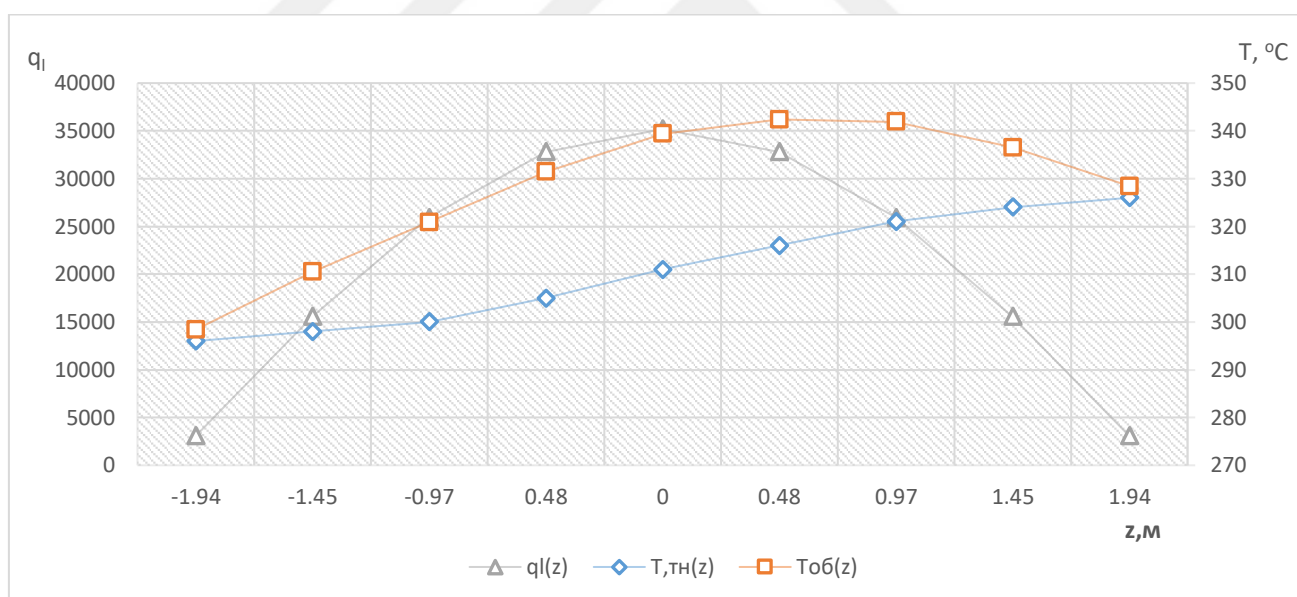


Рис .3.6. Распределение температуры оболочки твэла по высоте для скорости 5 м/с

Определим коэффициент теплопроводности оболочки твэла по справочнику теплофизических свойств материалов ядерной техники [6, стр. 208].

$$\lambda_{об1} = 20,6 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}, \text{ при } \overline{T_{об1}^{\text{нар}}} = 590,9 \text{ К}$$

$$\lambda_{об2} = 20,6 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}, \text{ при } \overline{T_{об2}^{\text{нар}}} = 592,4^\circ\text{C}$$

$$\lambda_{об3} = 20,6 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}, \text{ при } \overline{T_{об3}^{\text{нар}}} = 593,1^\circ\text{C}$$

Определим термическое сопротивление оболочки твэла:

$$R_{\lambda 1}^{об} = \frac{\ln\left(\frac{d_2}{d_2 - 2 \cdot \delta_{об}}\right)}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{об1}} = \frac{\ln\left(\frac{9.3}{9.3 - 2 \cdot 0.72}\right)}{2 \cdot \pi \cdot 20,6} = 0,00128 \frac{\text{м}\cdot\text{К}}{\text{Вт}}$$

$$R_{\lambda 2}^{об} = 0,00128 \frac{\text{м}\cdot\text{К}}{\text{Вт}}$$

$$R_{\lambda 3}^{об} = 0,00128 \frac{\text{м}\cdot\text{К}}{\text{Вт}}$$

Функция распределения температуры на внутренней поверхности оболочки твэла:

$$T_{об}^{\text{вн}}(z) = T_{об}^{\text{нар}}(z) + R_{\lambda}^{об} \cdot q_l(z)$$

В таблицах, представленных ниже, соответственно показано распределение температуры внутренней поверхности твэла по высоте для каждой из трех скоростей.

Таблица 3.12

Распределение температуры внутренней поверхности ТВЭЛ по высоте для скорости 3,5 м/с

w= 3,5 м/с			
Z, м	$T_{об}^{нар}(z), ^\circ\text{C}$	$q_l(z), \frac{\text{Вт}}{\text{м}}$	$T_{об}^{вн}(z), ^\circ\text{C}$
1,94	327,6	1554	329,6
1,45	333,7	9127	345,4
0,97	337,5	15438	357,2
0,48	336,9	19611	362,1
0,00	333,5	21069	360,5
-0,48	325,9	19611	351,1
-0,97	316,5	15438	336,2
-1,45	307,7	9127	319,4
-1,94	297,6	1554	299,6

Таблица 3.13

Распределение температуры внутренней поверхности ТВЭЛ по высоте для скорости 4,5 м/с

w= 4,5 м/с			
Z, м	$T_{об}^{нар}(z), ^\circ\text{C}$	$q_l(z), \frac{\text{Вт}}{\text{м}}$	$T_{об}^{вн}(z), ^\circ\text{C}$
1,71	328,2	2513	331,4
1,28	335,9	13296	353,0
0,85	341,0	22261	369,5
0,42	341,3	28182	377,4
0,00	338,2	30250	377,0
-0,42	330,3	28182	366,4
-0,85	320,0	22261	348,5
-1,28	309,9	13296	327,0
-1,71	298,2	2513	301,4

Таблица 3.14

Распределение температуры внутренней поверхности ТВЭЛа по высоте для скорости 5 м/с

w= 5 м/с			
Z, м	$T_{об}^{нар}(z), ^\circ\text{C}$	$q_l(z), \frac{\text{Вт}}{\text{м}}$	$T_{об}^{вн}(z), ^\circ\text{C}$
1,62	328,4	3072	332,4
1,22	336,5	15565	356,5
0,81	341,9	25942	375,1
0,40	342,4	32792	384,4
0,00	339,4	35184	384,4
-0,40	331,4	32792	373,4
-0,81	320,9	25942	354,1
-1,22	310,5	15565	330,5
-1,62	298,4	3072	302,4

3.9. Распределение температур топлива по высоте ТВЭЛ

Определим коэффициент теплопроводности газового зазора по справочнику теплофизических свойств материалов ядерной техники [6, стр. 287]:

$$\lambda_{31} = 0,259 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}, \text{ при } \overline{T_{061}^{\text{ВН}}} = 609,7\text{К}$$

$$\lambda_{32} = 0,263 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}, \text{ при } \overline{T_{062}^{\text{ВН}}} = 619,9^\circ\text{С}$$

$$\lambda_{33} = 0,264 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}, \text{ при } \overline{T_{063}^{\text{ВН}}} = 626,0^\circ\text{С}$$

Определим коэффициент термического сопротивления газового зазора:

$$R_{\lambda 1}^{\text{ззз}} = \frac{\ln\left(\frac{d_2 - 2 \cdot \delta_{06}}{d_1}\right)}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{31}} = \frac{\ln\left(\frac{9,3 - 2 \cdot 0,72}{7,72}\right)}{2 \cdot \pi \cdot 0,259} = 0,0126 \frac{\text{м}\cdot\text{К}}{\text{Вт}}$$

$$R_{\lambda 2}^{\text{ззз}} = 0,0124 \frac{\text{м}\cdot\text{К}}{\text{Вт}}$$

$$R_{\lambda 3}^{\text{ззз}} = 0,0123 \frac{\text{м}\cdot\text{К}}{\text{Вт}}$$

Функция распределения внешней поверхности таблетки топлива:

$$T_{\Gamma}^{\text{нар}}(z) = T_{06}^{\text{ВН}}(z) + R_{\lambda 1}^{\text{ззз}} \cdot q_{l1}(z)$$

В таблицах, представленных ниже, соответственно показано распределение температуры внешней поверхности таблетки топлива по высоте для каждой из трех скоростей.

Таблица 3.15

Распределение температуры внешней поверхности таблетки топлива для
 скорости 3,5 м/с

w= 3,5 м/с			
Z, м	$T_{06}^{BH}(z), ^\circ\text{C}$	$q_l(z), \frac{\text{Вт}}{\text{м}}$	$t_r^{\text{нар}}(z), ^\circ\text{C}$
1,94	329,6	1554	349
1,45	345,4	9127	460
0,97	357,2	15438	551
0,48	362,1	19611	609
0,00	360,5	21069	626
-0,48	351,1	19611	598
-0,97	336,2	15438	530
-1,45	319,4	9127	434
-1,94	299,6	1554	319

Таблица 3.16

Распределение температуры внешней поверхности таблетки топлива для
 скорости 4,5 м/с

w= 4,5 м/с			
Z, м	$T_{06}^{BH}(z), ^\circ\text{C}$	$q_l(z), \frac{\text{Вт}}{\text{м}}$	$t_r^{\text{нар}}(z), ^\circ\text{C}$
1,71	331,4	2513	362
1,28	353,0	13296	518
0,85	369,5	22261	646
0,42	377,4	28182	727
0,00	377,0	30250	752
-0,42	366,4	28182	716
-0,85	348,5	22261	625
-1,28	327,0	13296	492
-1,71	301,4	2513	332

Таблица 3.17

Распределение температуры внешней поверхности таблетки топлива для скорости 5 м/с

w= 5 м/с			
Z, м	$T_{об}^{BH}(z), ^\circ\text{C}$	$q_l(z), \frac{\text{Вт}}{\text{м}}$	$t_r^{нар}(z), ^\circ\text{C}$
1,62	332,4	3072	370
1,22	356,5	15565	549
0,81	375,1	25942	696
0,40	384,4	32792	790
0,00	384,4	35184	819
-0,40	373,4	32792	779
-0,81	354,1	25942	675
-1,22	330,5	15565	523
-1,62	302,4	3072	340

Определим коэффициент теплопроводности топлива UO_2 по справочнику теплофизических свойств материалов ядерной техники [6, стр. 125]:

$$\lambda_{f1} = 4,31 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}, \text{ при } \overline{T_{r1}^{нар}} = 715^\circ\text{C}$$

$$\lambda_{f2} = 4,08 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}, \text{ при } \overline{T_{r2}^{нар}} = 766^\circ\text{C}$$

$$\lambda_{f3} = 3,96 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}, \text{ при } \overline{T_{r3}^{нар}} = 792^\circ\text{C}$$

Определим коэффициент термического сопротивления топлива UO_2 :

$$R_{\lambda 1}^r = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \lambda_{f1}} = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot 4,31} = 0,0185 \frac{\text{м}\cdot\text{К}}{\text{Вт}}$$

$$R_{\lambda 2}^r = 0,0195 \frac{\text{м}\cdot\text{К}}{\text{Вт}}$$

$$R_{\lambda 3}^r = 0,0201 \frac{\text{м}\cdot\text{К}}{\text{Вт}}$$

Функция распределения температуры в центре блока горючего:

$$T_{r1}^{\Pi}(z) = T_{r1}^{\text{Нап}}(z) + R_{\lambda}^{\Gamma} \cdot q_l(z)$$

В таблицах, представленных ниже, соответственно показано распределение температуры в центре блока горючего по высоте для каждой из трех скоростей.

Таблица 3.18

Распределение температуры в центре блока горючего по высоте для скорости
3,5 м/с

w= 3,5 м/с			
Z, м	$t_r^{\text{Нап}}(z), ^\circ\text{C}$	$q_l(z), \frac{\text{Вт}}{\text{м}}$	$t_r^{\Pi}(z), ^\circ\text{C}$
1,94	349	1554	377
1,45	460	9127	629
0,97	551	15438	837
0,48	609	19611	971
0,00	626	21069	1015
-0,48	598	19611	960
-0,97	530	15438	816
-1,45	434	9127	603
-1,94	319	1554	347

Таблица 3.19

Распределение температуры в центре блока горючего по высоте для скорости
4,5 м/с

w= 4,5 м/с			
Z, м	$t_{г}^{нап}(z), ^\circ\text{C}$	$q_l(z), \frac{\text{Вт}}{\text{м}}$	$t_{г}^{н}(z), ^\circ\text{C}$
1,71	362	2513	411
1,28	518	13296	777
0,85	646	22261	1080
0,42	727	28182	1277
0,00	752	30250	1343
-0,42	716	28182	1266
-0,85	625	22261	1059
-1,28	492	13296	751
-1,71	332	2513	381

Таблица 3.20

Распределение температуры в центре блока горючего по высоте для скорости
5 м/с

w= 5 м/с			
Z, м	$t_{г}^{нап}(z), ^\circ\text{C}$	$q_l(z), \frac{\text{Вт}}{\text{м}}$	$t_{г}^{н}(z), ^\circ\text{C}$
1,62	370	3072	432
1,22	549	15565	862
0,81	696	25942	1217
0,40	790	32792	1449
0,00	819	35184	1527
-0,40	779	32792	1438
-0,81	675	25942	1196
-1,22	523	15565	836
-1,62	340	3072	402

Определим коэффициент суммарного термического сопротивления:

$$\begin{aligned}\sum R_{i1} &= R_{\alpha 1} + R_{\lambda 1}^{06} + R_{\lambda 1}^{3аз} + R_{\lambda 1}^{\Gamma} \\ &= 1,07 \cdot 10^{-3} + 0,00128 + 0,0126 + 0,0184 = 0,0334 \frac{\text{м}\cdot\text{К}}{\text{Вт}}\end{aligned}$$

$$\sum R_{i2} = 0,0341 \frac{\text{м}\cdot\text{К}}{\text{Вт}}$$

$$\sum R_{i2} = 0,0345 \frac{\text{м}\cdot\text{К}}{\text{Вт}}$$

Определим максимальную температуру в центре блока горючего

$$\begin{aligned}(T_{\Gamma 1}^{\text{Ц}})_{\max} &= T_{\text{вх}} + \frac{\Delta T}{2} + q_{l1}^{\max} \sum R_{i1} \sqrt{1 + \left(\frac{\Delta T}{2q_{l1}^{\max} \sum R_{i1}}\right) \frac{1}{\sin^2\left(\frac{\pi H_{\text{аз1}}}{2H_{\text{аз1}}}\right)}} \\ &= 296 + \frac{30}{2} + 21 \cdot 10^3 \cdot 0,0334 \sqrt{1 + \left(\frac{30}{2 \cdot 21 \cdot 10^3 \cdot 0,0334}\right) \frac{1}{\sin^2\left(\frac{\pi \cdot 3,89}{2 \cdot 4,08}\right)}} = 1022,9^{\circ}\text{C}\end{aligned}$$

$$(T_{\Gamma 2}^{\text{Ц}})_{\max} = 1350,5^{\circ}\text{C}$$

$$(T_{\Gamma 3}^{\text{Ц}})_{\max} = 1534,7^{\circ}\text{C}$$

Определим высоту, соответствующую максимальной температуре

$$\begin{aligned}Z(T_{\Gamma 1}^{\text{Ц}})_{\max} &= \frac{H'_{\text{аз1}}}{\pi} \cdot \text{arctg} \frac{\Delta T}{2 \cdot \sin\left(\frac{\pi H_{\text{аз1}}}{2H_{\text{аз1}}}\right) \cdot q_{l1}^{\max} \sum R_{i1}} \\ &= \frac{4,08}{\pi} \cdot \text{arctg} \frac{30}{2 \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot 4,08}{2 \cdot 3,89}\right) \cdot 21 \cdot 10^3 \cdot 0,0334} = 0,0277 \text{ м}\end{aligned}$$

$$Z(T_{\Gamma 2}^{\text{Ц}})_{\max} = 0,0168 \text{ м}$$

$$Z(T_{\Gamma 3}^{\text{Ц}})_{\max} = 0,0136 \text{ м}$$

3.10. Расчет гидравлических потерь

Гидравлические потери разделим на два вида: потери на трение и потери в местных сопротивлениях.

Принимаем:

- Расстояние между кромками соседних патрубков: $H=1000$ мм;
- Внутренний диаметр патрубка: $D_0=850$ мм;
- Размер кольцевого зазора между шахтой и корпусом реактора: $h=200$

мм;

Определим радиус закругления патрубка:

$$R = 0,2 \cdot D_0 = 0,2 \cdot 850 = 170 \text{ мм}$$

Определим высоту опускного участка:

$$l_{оп1} = 1,5 \cdot H_{аз} = 1,5 \cdot 3,89 = 5,83 \text{ м}$$

$$l_{оп2} = 5,15 \text{ м}$$

$$l_{оп3} = 4,88 \text{ м}$$

Определим длину участка активной зоны

$$l_{аз1} = H_{аз} = 3,89 \text{ м}$$

$$l_{аз2} = 3,43 \text{ м}$$

$$l_{аз3} = 3,25 \text{ м}$$

Определим длину выходного участка

$$l_{вых1} = l_{оп1} - l_{аз1} + D_0 + 1,5 \cdot H = 5,83 - 3,89 + 0,85 + 1,5 \cdot 1 = 4,29 \text{ м}$$

$$l_{вых2} = 4,06 \text{ м}$$

$$l_{вых3} = 3,97 \text{ м}$$

Определим коэффициенты динамической вязкости теплоносителя на входе реактор при $T_{вх}=296^\circ\text{C}$, в активной зоне при $T=310^\circ\text{C}$, на выходе из реактора $T_{вых}=326^\circ\text{C}$. Используя Справочные таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара [5].

$$\mu_{вх} = 90,6 \cdot 10^{-6} \text{ Па}\cdot\text{с}; \mu_{аз} = 84,8 \cdot 10^{-6} \text{ Па}\cdot\text{с}; \mu_{вых} = 78,6 \cdot 10^{-6} \text{ Па}\cdot\text{с};$$

3.10.1. Потери на трение в реакторе

Для расчета потерь на трение разобьем реактор на три участка:

- Опуск в кольцевом зазоре между корпусом и шахтой после выхода из входного патрубка.

- Течение через саму АЗ.

- Течение в пространстве над активной зоной.

1) Опускной участок:

Определим площадь проходного сечения кольцевого зазора, принимаем

$$2\delta_{\text{ш}} = 0,17\text{ м}$$

$$F_{\text{кз1}} = \frac{\pi \cdot (D_{\text{аз1}} + 2 \cdot h + 2 \cdot \delta_{\text{ш}})^2}{4} - \frac{\pi \cdot (D_{\text{аз1}} + 2 \cdot \delta_{\text{ш}})^2}{4} = \frac{\pi \cdot (4,32 + 2 \cdot 0,2 + 0,17)^2}{4} - \frac{\pi \cdot (4,32 + 0,17)^2}{4} = 4,27\text{ м}^2$$

$$F_{\text{кз2}} = 3,82\text{ м}^2$$

$$F_{\text{кз3}} = 3,64\text{ м}^2$$

Определим скорость теплоносителя в опускном участке:

$$W_{\text{оп1}} = \frac{G}{\rho_{\text{вх}} \cdot F_{\text{кз1}}} = \frac{18807,9}{737,5 \cdot 4,27} = 5,96\text{ м/с}$$

$$W_{\text{оп2}} = 6,67\text{ м/с}$$

$$W_{\text{оп3}} = 6,99\text{ м/с}$$

Определим гидравлический участок опускного участка:

$$d_{\text{г}} = 2 \cdot h = 2 \cdot 0,2 = 0,4\text{ м}$$

Определим число Рейнольдса

$$Re_1 = \frac{W_{\text{оп1}} \cdot d_{\text{г}} \cdot \rho_{\text{вх}}}{\mu_{\text{вх}}} = \frac{5,96 \cdot 0,4 \cdot 737,5}{90,6 \cdot 10^{-6}} = 19,4 \cdot 10^6$$

$$Re_2 = 21,7 \cdot 10^6$$

$$Re_3 = 22,7 \cdot 10^6$$

Определим коэффициент трения,

$$\lambda_{\text{тр1}} = (1,82 \cdot \lg Re_1 - 1,64)^{-2} = (1,82 \cdot \lg (19,4 \cdot 10^6) - 1,64)^{-2} = 0,0074$$

$$\lambda_{\text{тр2}} = 0,00729$$

$$\lambda_{\text{тр3}} = 0,00724$$

Определим потери на трение в опускном участке

$$\Delta p_{\text{тр}1} = \lambda_{\text{тр}1} \cdot \frac{l_{\text{оп}1} \cdot \rho_{\text{вх}} W_{\text{оп}1}^2}{d_{\Gamma} \cdot 2} = 0,0074 \cdot \frac{5,83 \cdot 737,5 \cdot 5,96^2}{0,4 \cdot 2} = 1,41 \text{ кПа}$$

$$\Delta p_{\text{тр}2} = 1,54 \text{ кПа}$$

$$\Delta p_{\text{тр}3} = 1,59 \text{ кПа}$$

2) Участок активной зоны:

Определим число Рейнольдса

$$Re_1 = \frac{W_{\text{max}1} \cdot D_{\Gamma} \cdot \rho_{\text{ср}}}{\mu_{\text{аз}}} = \frac{6,85 \cdot 9,79 \cdot 10^{-3} \cdot 705,9}{84,8 \cdot 10^{-6}} = 0,558 \cdot 10^6$$

$$Re_2 = 0,711 \cdot 10^6$$

$$Re_3 = 0,786 \cdot 10^6$$

Определим коэффициент трения:

$$\lambda_{\text{тр}1} = (1,82 \cdot \lg Re_1 - 1,64)^{-2} = (1,82 \cdot \lg (0,558 \cdot 10^6) - 1,64)^{-2} = 0,0128$$

$$\lambda_{\text{тр}2} = 0,0123$$

$$\lambda_{\text{тр}3} = 0,0121$$

Определим потери на трение на участке активной зоны:

$$\Delta p_{\text{тр}1} = \lambda_{\text{тр}} \cdot \frac{l_{\text{аз}1} \cdot \rho_{\text{ср}} W_1^2}{D_{\Gamma} \cdot 2} = 0,0127 \cdot \frac{3,89 \cdot 705,9 \cdot 3,5^2}{9,79 \cdot 10^{-3} \cdot 2} = 22,09 \text{ кПа}$$

$$\Delta p_{\text{тр}2} = 32,2 \text{ кПа}$$

$$\Delta p_{\text{тр}3} = 37,7 \text{ кПа}$$

3) Выходной участок:

Определим площадь проходного сечения над ТВС:

$$F_{\text{над АЗ}1} = 0,7 \cdot F_{\text{АЗ}1} = 0,7 \cdot 14,69 = 10,28 \text{ м}^2$$

$$F_{\text{над АЗ}2} = 8,00 \text{ м}^2$$

$$F_{\text{над АЗ}3} = 7,20 \text{ м}^2$$

Определим скорость теплоносителя на выходном участке

$$W_{\text{вых}1} = \frac{G}{\rho_{\text{вых}} \cdot F_{\text{над АЗ}1}} = \frac{18807,9}{668,1 \cdot 10,28} = 2,73 \text{ м/с}$$

$$W_{\text{вых}2} = 3,51 \text{ м/с}$$

$$W_{\text{вых}3} = 3,90 \text{ м/с}$$

Определим гидравлический диаметр выходного участка

$$d_{r1} = \sqrt{\frac{4 \cdot F_{\text{НадАЗ1}}}{n_{\text{касс}} \cdot \pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 10,28}{287 \cdot \pi}} = 0,213 \text{ м}$$

$$d_{r2} = 0,213 \text{ м}$$

$$d_{r3} = 0,213 \text{ м}$$

Определим число Рейнольдса

$$Re_1 = \frac{W_{\text{ВЫХ}} \cdot d_{r1} \cdot \rho_{\text{ВЫХ}}}{\mu_{\text{ВЫХ}}} = \frac{2,73 \cdot 0,213 \cdot 668,1}{78,6 \cdot 10^{-6}} = 4,96 \cdot 10^6$$

$$Re_2 = 6,38 \cdot 10^6$$

$$Re_3 = 7,09 \cdot 10^6$$

Определим коэффициент трения

$$\lambda_{\text{тр1}} = (1,82 \cdot \lg Re_1 - 1,64)^{-2} = (1,82 \cdot \lg (4,96 \cdot 10^6) - 1,64)^{-2} = 0,00899$$

$$\lambda_{\text{тр1}} = 0,00866$$

$$\lambda_{\text{тр1}} = 0,00853$$

Определим потери на трение на выходном участке

$$\Delta p_{\text{тр1}} = \lambda_1 \cdot \frac{l_{\text{ВЫХ1}} \cdot \rho_{\text{ВЫХ}} W_{\text{ВЫХ1}}^2}{d_{r1} \cdot 2} = 0,00899 \cdot \frac{4,29 \cdot 668,1 \cdot 2,73^2}{0,213 \cdot 2} = 0,452 \text{ кПа}$$

$$\Delta p_{\text{тр2}} = 0,682 \text{ кПа}$$

$$\Delta p_{\text{тр3}} = 0,811 \text{ кПа}$$

Определим суммарные потери на трение

$$\Sigma \Delta p_{\text{тр1}} = 1,41 + 22,09 + 0,452 = 23,9 \text{ кПа}$$

$$\Sigma \Delta p_{\text{тр2}} = 34,4 \text{ кПа}$$

$$\Sigma \Delta p_{\text{тр3}} = 40,1 \text{ кПа}$$

3.10.2. Местные сопротивления

В реакторе присутствует множество различных местных сопротивлений:

- Вход в реактор через входные патрубки
- Поворот на 180 в напорной камере.
- Вход в АЗ через нижнюю решетку
- Дистанционирующие решетки
- Выход из верхней решетки активной зоны
- Поворот теплоносителя на 90°

- Выход теплоносителя из реактора.

На Рисунке 3.7 приведена схема местных гидросопротивлений реактора ВВЭР-1200.

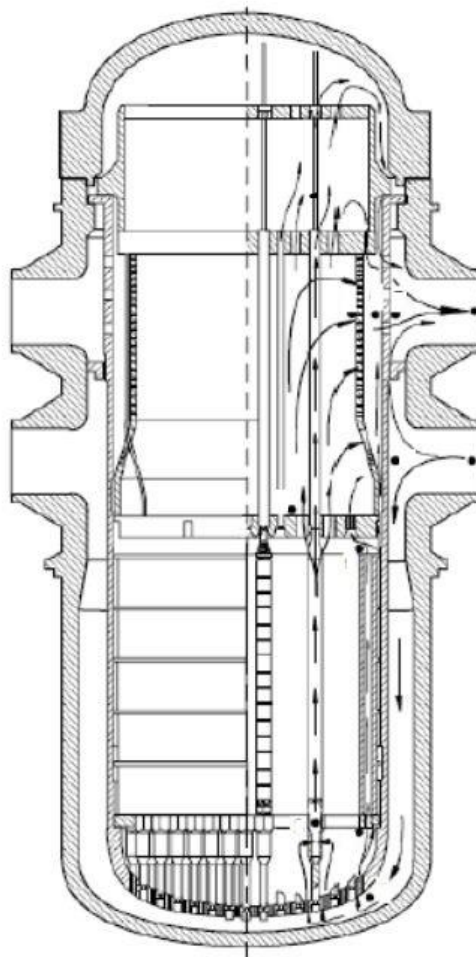


Рис. 3.7. Схема местных гидросопротивлений реактора ВВЭР-1200

1) Вход теплоносителя в реактор из входного патрубка

Принимаем отношение радиуса закругления кромки патрубка к внутреннему диаметру патрубка равно 0,2.

$$\frac{r}{D_0} = 0,2$$

$$r = 0,2 \cdot D_0 = 0,2 \cdot 0,85 = 0,17 \text{ м}$$

Определим отношения размера кольцевого зазора между шахтой и корпусом к внутреннему диаметру патрубка:

$$\frac{h}{D_0} = \frac{0,2}{0,85} = 0,235$$

Определим коэффициент местного сопротивления $\zeta_M = f\left(\frac{r}{D_0}, \frac{h}{D_0}\right)$ на диаграмме 11-7 с.442, справочник по гидравлическим сопротивлениям [7].

$$\zeta_M = 0,60$$

Принимаем число входных и выходных патрубков $n_{\Pi} = 4$

Определим общее проходное сечение патрубков

$$F_{\Pi} = n_{\Pi} \cdot \frac{\pi \cdot D_0^2}{4} = 4 \cdot \frac{\pi \cdot 0,85^2}{4} = 2,27 \text{ м}^2$$

Определим входную скорость теплоносителя

$$W_{\text{ВХ}} = \frac{G}{\rho_{\text{ВХ}} \cdot F_{\Pi}} = \frac{18807,9}{737,5 \cdot 2,27} = 11,2 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Определим местное сопротивление входа в реактор из входного патрубка

$$\Delta p_{\text{ВХ}} = \zeta \cdot \frac{\rho_{\text{ВХ}} W_{\text{ВХ}}^2}{2} = 0,60 \cdot \frac{737,5 \cdot 11,2^2}{2} = 27,95 \text{ кПа}$$

2) Пространственный поворот на 180° в нижней части реактора:

Принимаем отношения радиуса кромок поворота к внутреннему диаметру

$$\frac{r}{D_0} = \frac{r_{\text{к}}}{D_{\text{а3}}} = 0,05$$

Определим радиус кромок поворота экрана

$$r_{\text{к1}} = D_{\text{а31}} \cdot \frac{r}{D_0} = 4,32 \cdot 0,05 = 0,216 \text{ м}$$

$$r_{\text{к2}} = 0,190 \text{ м}$$

$$r_{\text{к3}} = 0,180 \text{ м}$$

Принимаем высоту напорного коллектора $H_{\text{к1}} = 0,3 \text{ м}$

Определяем отношение напорного коллектора к внутреннему диаметру

$$\left(\frac{H_{\text{к}}}{D_{\text{а31}}}\right) = \frac{0,3}{4,32} = 0,0693$$

$$\left(\frac{H_{\text{к}}}{D_{\text{а32}}}\right) = 0,0786$$

$$\left(\frac{H_{\text{к}}}{D_{\text{а33}}}\right) = 0,0828$$

Определяем относительную величину кольцевой щели

$$m_{\text{к1}} = \frac{4 \cdot F_{\text{к31}}}{\pi \cdot D_{\text{а31}}^2} = \frac{4 \cdot 4,27}{\pi \cdot 4,32^2} = 0,291$$

$$m_{\text{к2}} = 0,334$$

$$m_{к3} = 0,354$$

Определим значение коэффициента местного сопротивления $\zeta = f\left(\frac{r}{D_0}, m, \frac{H_k}{D_{аз}}\right)$ из диаграммы 6-25, стр. 267, справочник по гидравлическим сопротивлениям[7].

Т. К. $m_k < 0,75$. Мы принимаем значение величины кольцевой щели равное $m_k = 0,75$.

$$\zeta_1 = 5,8; \zeta_2 = 5,8; \zeta_3 = 5,8.$$

Определим скорость теплоносителя по сечению активной зоны

$$W_{01} = \frac{G}{\rho_{вх} \cdot F_{аз1}} = \frac{18807,9}{737,5 \cdot 14,6} = 1,73 \frac{м}{с}$$

$$W_{02} = 2,23 \text{ м/с}$$

$$W_{03} = 2,47 \text{ м/с}$$

Определим местное сопротивление пространственного поворота на 180° в нижней части реактора

$$\Delta p_{пов1} = \zeta \cdot \frac{\rho_{вх} W_{01}^2}{2} = 5,8 \cdot \frac{737,5 \cdot 1,73^2}{2} = 6,4 \text{ кПа}$$

$$\Delta p_{пов1} = 10,6 \text{ кПа}$$

$$\Delta p_{пов1} = 13,1 \text{ кПа}$$

3) Вход через решетку, на которую опирается активная зона:

Принимаем толщину решетки равную $l = 100$ мм

Определим относительную величину проходного сечения

$$\bar{f}_1 = \frac{F_{H_2O1}^\Sigma}{F_{аз1}} = \frac{7,38}{14,69} = 0,502 \text{ м}^2$$

$$\bar{f}_2 = 0,500 \text{ м}^2$$

$$\bar{f}_3 = 0,496 \text{ м}^2$$

Определим площадь живого сечения одного отверстия

$$f_{отв1} = \frac{F_{H_2O1}^\Sigma}{n_{к1}} = \frac{7,38}{287} = 0,0256 \text{ м}^2$$

$$f_{отв2} = 0,0256 \text{ м}^2$$

$$f_{отв3} = 0,0256 \text{ м}^2$$

Определим периметр отверстия решетки

$$P_1 = 2 \cdot \sqrt{\pi \cdot f_{\text{отв1}}} = 2 \cdot \sqrt{\pi \cdot 0,0256} = 0,567 \text{ м}$$

$$P_2 = 0,567 \text{ м}$$

$$P_3 = 0,567 \text{ м}$$

Определим гидравлический диаметр решетки

$$d_{r1} = \frac{4 \cdot f_{\text{отв1}}}{P_1} = \frac{4 \cdot 0,0256}{0,567} = 0,180 \text{ м}$$

$$d_{r2} = 0,180 \text{ м}$$

$$d_{r3} = 0,180 \text{ м}$$

Определим отношение толщины гидравлической решетки к гидравлическому диаметру

$$\frac{l}{d_{r1}} = \frac{0,1}{0,256} = 0,552$$

$$\frac{l}{d_{r2}} = 0,552$$

$$\frac{l}{d_{r3}} = 0,552$$

Определим значение коэффициента местного сопротивления $\zeta = f(\bar{f}, \frac{l}{d_r})$ из диаграммы 8-3, стр. 333, справочник по гидравлическим сопротивлениям [7].

$$\zeta_1 = 3,32; \zeta_2 = 3,32; \zeta_3 = 3,32.$$

Определим местное сопротивление на входе в активную зону через решетку

$$\Delta p_{\text{реш1}} = \zeta \cdot \frac{\rho_{\text{вх}} W_{01}^2}{2} = 3,32 \cdot \frac{737,5 \cdot 1,73^2}{2} = 3,68 \text{ кПа}$$

$$\Delta p_{\text{реш1}} = 6,09 \text{ кПа}$$

$$\Delta p_{\text{реш1}} = 7,52 \text{ кПа}$$

4) Сопротивление дистанционирующих решеток

Принимаем относительную величину проходного сечения: $f=0.7$

Определим значение коэффициента местного сопротивления $\zeta = f(\bar{f})$ на диаграмме 8-1 с.331, справочник по гидравлическим сопротивлениям [7].

$$\zeta = 0,97$$

Принимаем шаг установки дистанционирующих решеток: $a_{\text{реш}} = 250 \text{ мм}$

Определим количество решеток

$$n_{\text{реш1}} = \frac{H_{\text{аз1}}}{a_{\text{реш}}} = \frac{3,89}{0,25} = 16$$

$$n_{\text{реш2}} = 14$$

$$n_{\text{реш3}} = 13$$

Определим местное сопротивление дистанционирующих решеток

$$\Delta p_{\text{реш1}} = n_{\text{реш1}} \cdot \zeta \cdot \frac{\rho_{\text{ср}} W_{\text{max}}^2}{2} = 16 \cdot 0,97 \cdot \frac{705,9 \cdot 3,5^2}{2} = 67,1 \text{ кПа}$$

$$\Delta p_{\text{реш2}} = 97,05 \text{ кПа}$$

$$\Delta p_{\text{реш3}} = 111,2 \text{ кПа}$$

5) Выход из верхней решетки активной зоны

Определим проходное сечение блока защитных труб

$$F_{\text{бзт1}} = 0,7 \cdot \frac{F_{\text{аз1}}}{n_{\text{к1}}} = 0,7 \cdot \frac{14,69}{247} = 0,0357 \text{ м}^2$$

$$F_{\text{бзт2}} = 0,0357 \text{ м}^2$$

$$F_{\text{бзт3}} = 0,0357 \text{ м}^2$$

Определим отношение проходного сечения в кассете к проходному сечению защитных труб

$$\left(\frac{F_{\text{H2O}}^{\text{кас}}}{F_{\text{бзт1}}} \right) = \frac{25,678 \cdot 10^3}{0,0357 \cdot 10^6} = 0,71778$$

$$\left(\frac{F_{\text{H2O}}^{\text{кас}}}{F_{\text{бзт2}}} \right) = 0,71776$$

$$\left(\frac{F_{\text{H2O}}^{\text{кас}}}{F_{\text{бзт3}}} \right) = 0,71776$$

Определим значение коэффициента местного сопротивления из диаграммы 4-1, стр. 129, кривой 1, справочник по гидравлическим сопротивлениям [7].

$$\zeta_1=0,09; \zeta_2=0,09; \zeta_3=0,09$$

Определим местное сопротивление выхода из верхней решетки активной зоны

$$\Delta p_{\text{вых реш1}} = \zeta_1 \cdot \frac{\rho_{\text{вых}} W_{\text{max}}^2}{2} = 0,09 \cdot \frac{668,1 \cdot 3,5^2}{2} = 0,37 \text{ кПа}$$

$$\Delta p_{\text{вых реш2}} = 0,61 \text{ кПа}$$

$$\Delta p_{\text{вых реш3}} = 0,75 \text{ кПа}$$

б) Поворот теплоносителя на 90°

Принимаем значение коэффициента местного сопротивления при повороте потока на 90° равен $\zeta=0,2$.

Определим местное сопротивление при повороте потока на 90°

$$\Delta p_{\text{пов1}} = \zeta \cdot \frac{\rho_{\text{ввых}} W_{\text{max}}^2}{2} = 0,2 \cdot \frac{668,1 \cdot 3,5^2}{2} = 0,82 \text{ кПа}$$

$$\Delta p_{\text{пов2}} = 1,35 \text{ кПа}$$

$$\Delta p_{\text{пов3}} = 1,67 \text{ кПа}$$

7) Выход теплоносителя из реактора

Отношение радиуса скругления к диаметру выходного патрубка принимаем так же, как и для входного патрубка:

$$\frac{r}{D_0} = 0,2$$

Тогда радиус скругления

$$r = 0,2 \cdot D_0 = 0,2 \cdot 0,85 = 0,17 \text{ м}$$

Отношение размера кольцевого зазора к внутреннему диаметру патрубка

$$\frac{h}{D_0} = \frac{0,2}{0,85} = 0,235$$

Принимаем значение коэффициента местного сопротивления $\zeta=f\left(\frac{h}{D_0}, \frac{r}{D_0}\right)$ из диаграммы 3-5, стр. 104, справочник по гидравлическим сопротивлениям [7].

$$\zeta_1=0,141; \zeta_2=0,141; \zeta_3=0,141.$$

Определим скорость теплоносителя в выходном патрубке

$$W_{\text{ввых}} = \frac{G}{\rho_{\text{ввых}} \cdot F_{\text{п}}} = \frac{18807,9}{668,1 \cdot 2,27} = 12,4 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Определим местное сопротивление на выходе теплоносителя из реактора

$$\Delta p_{\text{ввых}} = \zeta \cdot \frac{\rho_{\text{ввых}} W_{\text{ввых}}^2}{2} = 0,141 \cdot \frac{668,1 \cdot 12,4^2}{2} = 7,25 \text{ кПа}$$

8) Определим общее гидравлическое сопротивление реактора

$$\begin{aligned} \sum \Delta p_{\text{р1}} &= \Delta p_{\text{вх}} + \Delta p_{\text{пов}} + \Delta p_{\text{вх реш1}} + \Delta p_{\text{реш1}} + \Delta p_{\text{ввых реш1}} + \Delta p_{\text{пов1}} + \Delta p_{\text{ввых}} \\ &= 27,95 + 6,44 + 3,68 + 67,10 + 0,37 + 0,82 + 7,25 = 113,6 \text{ кПа} \end{aligned}$$

$$\sum \Delta p_{\text{тр2}} = 150,9 \text{ кПа}$$

$$\sum \Delta p_{\text{тр3}} = 169,5 \text{ кПа}$$

3.10.3. Потери на ускорение потока в активной зоне

$$\Delta p_{\text{уск1}} = (\rho W_{\text{max1}})^2 \left(\frac{1}{\rho_{\text{вых}}} - \frac{1}{\rho_{\text{вх}}} \right) = (705,9 \cdot 6,85)^2 \left(\frac{1}{668,1} - \frac{1}{737,5} \right) = 3,29 \text{ кПа}$$

$$\Delta p_{\text{уск2}} = 5,34 \text{ кПа}$$

$$\Delta p_{\text{уск3}} = 6,53 \text{ кПа}$$

3.10.4. Нивелирный напор

$$\Delta p_{\text{нив1}} = \bar{\rho} g H_{\text{аз}} = 705,9 \cdot 9,8 \cdot 3,89 = 26,9 \text{ кПа}$$

$$\Delta p_{\text{нив2}} = 23,7 \text{ кПа}$$

$$\Delta p_{\text{нив3}} = 22,5 \text{ кПа}$$

3.10.5. Полное гидравлическое сопротивление системы

$$\begin{aligned} \Sigma \Delta p_{\text{г1}} &= \Sigma \Delta p_{\text{тр1}} + \Sigma \Delta p_{\text{м1}} + \Delta p_{\text{уск1}} + \Sigma \Delta p_{\text{нив1}} \\ &= 23,9 + 113,6 + 3,29 + 26,9 = 167,8 \text{ кПа} \end{aligned}$$

$$\Sigma \Delta p_{\text{г2}} = 214,9 \text{ кПа}$$

$$\Sigma \Delta p_{\text{г3}} = 238,7 \text{ кПа}$$

3.11. Выбор оптимального варианта

В таблице 3.21 представлены коэффициенты запаса по потерям давления и рассмотрим их зависимость от скорости теплоносителя.

Таблица 3.21

Потери давления и коэффициенты запаса для трех скоростей

№ варианта	W, м/с	Δp_p , МПа	$\Delta p_{\text{доп}}$, МПа	$n_{\text{зап}}$	$n_{\text{зап}}^{\text{доп}}$
1	3,5	0,168	0,38	6,44	1,5
2	4,5	0,215	0,38	5,09	1,5
3	5	0,239	0,38	4,61	1,5

Для всех значений скоростей значения температуры оболочки твэла и блока топлива, коэффициентов запаса до кризиса кипения, а также коэффициентов запаса по потерям давления, не превышают допустимых значений. В качестве оптимальной скорости течения теплоносителя выбираем $W = 5$ м/с. Потому что с этой скоростью рассчитанные значения имеют наименьшее отклонение от серийных значений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате работы был выполнен проект АЭС мощностью 1200 МВт с реактором типа ВВЭР-1200 на тепловых нейтронах. Предлагается строительство атомной электростанции в провинции Кыйыкёй, Турция.

В ходе работы были произведены расчет тепловой схемы и теплогидравлический расчет ядерного реактора. В результате теплогидравлического расчета были определены геометрические размеры активной зоны реактора, рассчитаны поля температур по высоте АЗ теплоносителя, оболочки твэла и топливных таблеток. Были вычислены гидравлические сопротивления для трех значений скорости течения теплоносителя и выбрано оптимальное ее значение.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бродов Ю.М. Справочник по теплообменным аппаратам паротурбинных установок. М.:Издательский дом МЭИ, 2016. 480с.
2. Щегляев А.В. Паровые турбины. М.: Изд-во «Энергия», 1976. 357с.
3. Александров А.А., Григорьев Б.А. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара – Москва – Издательство МЭИ, 1999г – 170с.
4. Чиркин В.С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники – Москва – Атомиздат, 1968г – 484с.
5. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям – Москва – Машиностроение, 1975г – 560с.
6. Кириллов П.Л., Юрьев Ю.С., Бобков В.П.: Справочник по теплогидравлическим расчетам: справочник. Под общ. ред. П.Л. Кириллова. – М.: Издательский дом «Энергоатомиздат», 1990. – 360 с.
7. Агафонова Н.Д., Парамонова И.Л., Парамонов А.П. – теплогидравлический расчет парогенераторов АЭС. – СПб – Издательство Политехн. ун-та, 2014г – 130с.
8. Калюттик А.А., Конович М.Н., Митюков В.Н. – Теория ядерных реакторов – СПб – Издательство Политехн. ун-та, 2017г – 70с.
9. Костюк А.Г., Фролов В.В. – Турбины тепловых и атомных станций – Москва – Издательство МЭИ, 2001г – 488с.