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

Работа допущена к защите

Руководитель ОП

_____ М.В. Конюшин

«___»_____2022г.

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

ПРОЕКТ АЭС МОЩНОСТЬЮ 1000 МВт

В ПРОВИНЦИИ Игнеада, 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.3251402/60101 Демирел Мехмет Бера

Руководитель
Доцент ВШАиТЭ ИЭ, к.т.н. Егоров М.Ю

Консультант
по нормоконтролю

Санкт-Петербург

2022

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

УТВЕРЖДАЮ
Руководитель ОП
_____ М.В. Конюшин
« » 2022 г.

ЗАДАНИЕ

по выполнению выпускной квалификационной работы
студенту Демирел Мехмет Бера, 3251402/60101

1. Тема работы: Проект АЭС мощностью 1000 МВт в провинции Игнеада, Турция

2. Срок сдачи студентом законченной работы: 11.01.2022 г.

3. Исходные данные по работе: тип реактора: ВВЭР; тип парогенератора: горизонтальный; теплофикационная нагрузка: 250 Гкал/час; номинальная температура теплоносителя 1-ого контура на выходе из реактора: 320 °С; расчетная температура охлаждающей воды: 20 °С; расчетная температура прямой сетевой воды: 110 °С

4. Содержание работы (перечень подлежащих разработке вопросов):
Введение;
Обоснование выбора площадки размещения АЭС;
Расчет тепловой схемы энергоблока АЭС с реактором типа ВВЭР-1000;
Нейтронно-физический расчет реактора типа ВВЭР-1000;
Заключение;
Приложение;
Список использованных источников

5. Перечень графического материала (с указанием обязательных чертежей): отсутствует

6. Консультанты по работе: отсутствуют.

7. Дата выдачи задания: 23.11.2021 г.

Руководитель ВКР _____ Егоров М.Ю.
(подпись) инициалы, фамилия

Задание принял к исполнению 11.01.2022 г.
(дата)

Студент _____ Демирел Мехмет Бера
(подпись) инициалы, фамилия

РЕФЕРАТ

В работе 85 стр., 11 рисунков, 14 таблицы.

РЕАКТОР ВВЭР, НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ, ТЕПЛОВАЯ СХЕМА, ТВЭЛ

В данной работе разработан проект АЭС с реакторами типа ВВЭР мощностью 1000 МВт. Проведен и обоснован выбор площадки размещения АЭС, выполнен расчет тепловой схемы энергоблока АЭС, целью которого было определение давления и температуры генерируемого пара, давления конденсации, оптимальной температуры питательной воды, давления деаэратора, давление и температуры подогреватели сетевой воды, число насосов, число перегревах, давление и влажность пара каждая от сетка у подогреватели высокого давления и подогреватели низкого давления, а также число подогревателей. В ходе расчета тепловой схемы энергоблока АЭС были вычислены расходы в элеметных схемах, эдектрическая мощность и КПД брутто и нетто АЭС. Осуществлен нейтронно-физический расчет, целью которого была оценка влияния нуклидного состава на воспроизводящие и размножающие свойства активной зоны реактора, рассчитано отравление и шлакование реактора.

В результате расчета были определены значения запаса реактивности соответственно обогащения топлива и построена зависимость запаса реактивности реактора от принятого обогащения чтобы выводил значения рекомендуемого обогащения для проект АЭС с реакторами типа ВВЭР мощностью 1000 МВт.

ABSTRACT

On 85 pages, 11 figures, 14 tables.

VVER REACTOR, NEUTRON-PHYSICAL CALCULATION, THERMAL SCHEME, TVEL

In this work, a project of a nuclear power plant with VVER type reactors with a capacity of 1000 MW was developed. The choice of the NPP site was made and justified, the calculation of the thermal scheme of the NPP power unit was performed, the purpose of which was to determine the pressure and temperature of the generated steam, the condensation pressure, the optimum feed water temperature, deaerator pressure, pressure and temperature of heating water heaters, number of pumps, number of superheats, steam pressure and humidity each compartment at high pressure and low pressure heaters, as well as the number of heaters, as well as the number of heaters. During the calculation of the thermal scheme of the NPP power unit, the expenses in the element schemes, the electric power and the gross and net efficiency of the NPP were calculated. Carried out the neutron-physical calculation, the purpose of which was to assess the influence of nuclide composition in reproducing and multiplying properties of a reactor core, calculated poisoning and slagging dealer.

As a result of the calculation, the values of the reactivity margin were determined, respectively, of the fuel enrichment and the dependence of the reactivity margin of the reactor on the adopted enrichment was plotted in order to derive the values of the recommended enrichment for a project of a nuclear power plant with VVER type reactors with a capacity of 1000 .

СОДЕРЖАНИЕ

СПИСОК ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ

- атомная электростанция (АЭС)
- водо–водяной энергетический реактор (ВВЭР)
- парогенератор (ПГ);
- цилиндр высокого давления (ЦВД);
- цилиндр низкого давления (ЦНД);
- сепаратор (С);
- конденсатор (К);
- конденсатный насос (КН);
- дренажные насосы (ДН);
- деаэратор (Д);
- питательный насос (ПН);
- точки смещения (ТС);
- генератор (Г);
- обессоливающая установка (БОУ);
- охладитель эжекторов (ОЭ);
- регулирующий клапан (РКУ);
- система радиационного контроля (СРК);
- система регенеративного подогрева воды – подогреватели высокого давления (ПВД) и подогреватели низкого давления (ПНД);
- подогреватели сетевой воды (ПСВ).

ВВЕДЕНИЕ

Всеобъемлющая энергетическая политика Турции направлена на обеспечение надежного, достаточного и своевременного энергоснабжения. Энергия и производство электроэнергии должны быть получены в экономичных и чистых условиях и таким образом, чтобы поддерживать и ориентировать целенаправленный рост и социальное развитие. В настоящее время в Турции не действует ни одна атомная электростанция (АЭС). Однако Турция рассматривает возможность начала реализации ядерной энергетической программы.

Хотя в Турции существуют конвенциональные ресурсы, этих ресурсов недостаточно для удовлетворения прогнозируемого роста спроса на энергию, за исключением бурого угля и гидроэнергии. На сегодняшний день около 68,9% спроса на энергоносители удовлетворено за счет импорта. Исследования энергетического планирования показывают, что спрос на энергию в Турции будет продолжать расти параллельно с экономическим развитием, индустриализацией и урбанизацией. В этом контексте Турция активизировала усилия по дальнейшей диверсификации первичных источников энергии, импорта (диверсифицированного как по типу, так и по происхождению), технологий и инфраструктуры, одновременно ускоряя производство и использование оставшегося потенциала внутренних ресурсов и повышение эффективности по всей цепочке спроса и предложения энергии. [1]

Объектом исследования является атомная электростанция с реакторной установкой ВВЭР-1000.

Предметом исследования являются расчет тепловой схемы энергоблока АЭС с реактором типа ВВЭР-1000, генеральный план АЭС и нейтронно-физический расчет реактора типа ВВЭР-1000.

В ходе расчета тепловой схемы энергоблока АЭС необходимо рассчитать параметры контура рабочего тела, число регенеративных подогревателей и давление в отборах, построить процесс расширения пара в

турбине, определить расходы в элементах схемы, электрическую и тепловую мощность энергоблока, а также показатели эффективности турбоустановки и энергоблока (с учетом потерь электроэнергии на собственные нужды).

В ходе расчета будут найдены нейтронно-физические характеристики реактора заданного материального состава, оценено влияние нуклидного состава на воспроизводящие и размножающие свойства активной зоны реактора, рассчитано отравление и шлакование реактора.

Цель данной работы: выбор площадки размещения АЭС, расчет тепловой схемы энергоблока АЭС с реактором типа ВВЭР, генеральный план АЭС и нейтронно-физический расчет реактора типа ВВЭР, состоящий в физическом обосновании конструкции и определении совокупности физических параметров, удовлетворяющего поставленным требованиям.

Для достижения данных целей, произвести решение следующих задач:

1) Исследование и выбор площадки размещения АЭС;
2) расчет тепловой схемы энергоблока АЭС с реактором типа ВВЭР;
3) нейтронно-физический расчет “горячего” состояния реактора на начало кампании;
4) Расчет “горячего” отравления реактора на конец капании;

ВЫБОР ПЛОЩАДКИ РАЗМЕЩЕНИЯ АЭС

В связи с необходимостью обеспечения надежного энергоснабжения в будущем, в Турции принято решение развивать ядерную энергию. Выбор площадки построения является один из важнейших этапов проектирования АЭС. В разных местах проводится разный анализ площадок, что приводит к разным типам атомных станций, которые можно строить. Выбор подходящего места является результатом процесса, при котором затраты минимизируются. Основываясь на рекомендациях по выбору площадки для АЭС при обсуждении процесса выбора площадки, необходимо рассмотреть определенные факторы, например, гидрологические и метеорологические характеристики предлагаемых площадок, потенциальное воздействие на станцию в результате аварий, связанных с соседними отраслями промышленности; определение зоны отчуждения и зоны низкой численности населения; транспортные и военные объекты; вопросы народонаселения, связанные с защитой населения от потенциальных опасностей серьезных аварий; аварийное планирование и планы безопасности, а также геологические / сейсмические. [2]. Места со следующими характеристиками не были рассмотрены:

1) Находится на активном переломе.
2) Рядом с вулканом.
3) Близко к густонаселенным городам и поселкам.
4) Не хватает охлаждающей воды.
5) Районы с частыми наводнениями

Посредством данных и информации, собранных и проанализированных в каждом районе, приоритет отдается рассмотрению таких критериев, как наличие достаточного количества охлаждающей воды, низкая плотность населения, близость к нагрузке, отсутствие вблизи областей с высоким потенциалом землетрясения. На основе критериев, принятых для строительства АЭС, был назван город Кыркларели региона Иглеада.

1.1. География и демография

Игнеада - небольшой город в районе Демиркёй в Турции провинция Кыркларели . Он расположен на побережье Черного моря и примерно в 5 км к югу от реки Мутлудере , которая образует границу с Болгарией . Игнеада - провинция на северо-западе Турции. Земля покрыта в основном дубовыми лесами, типичной флорой гор Йылдыз (Истранка). Лесное хозяйство, рыболовство и туризм - основные занятия населения города. [3]

Рис.1.1. Расположение провинции Кыркларели на карте территории Турции [4]

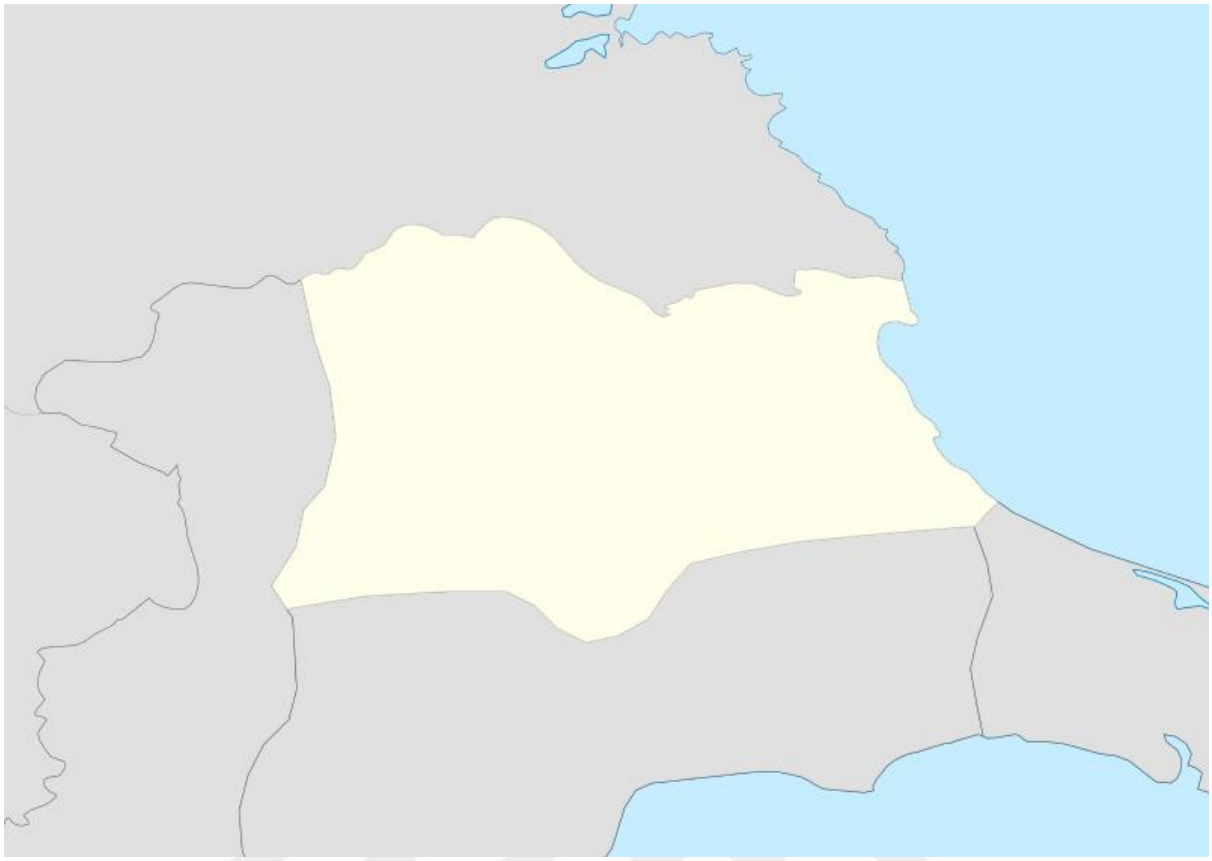

Рис.1.2. Расположение Игнеада в провинции Кыркларели [5]

Для оценки влияния проектируемой АЭС на население, необходимо знать численность населения и плотность населения в этом месте. Площадь этой сельской гмины составляет 877 км^2, население составляет 8829 человек (с 2020 года), плотность население – 994 человек/км^2. [6]

В провинции Игнеада АЭС планируется построить в районе Демиркей, город Кыркларели. Расстояние от этой сельской области до административного центра провинции составляет 27 км.

1.2. Метеорология

Температура воздуха. Климат в городе Игнеада умеренный. Зимой выпадает гораздо больше осадков, чем летом. Согласно классификации климата Кеппена-Гейгера, это можно назвать "C". Среднегодовая температура в городе Иглеада - 14,1 °C.

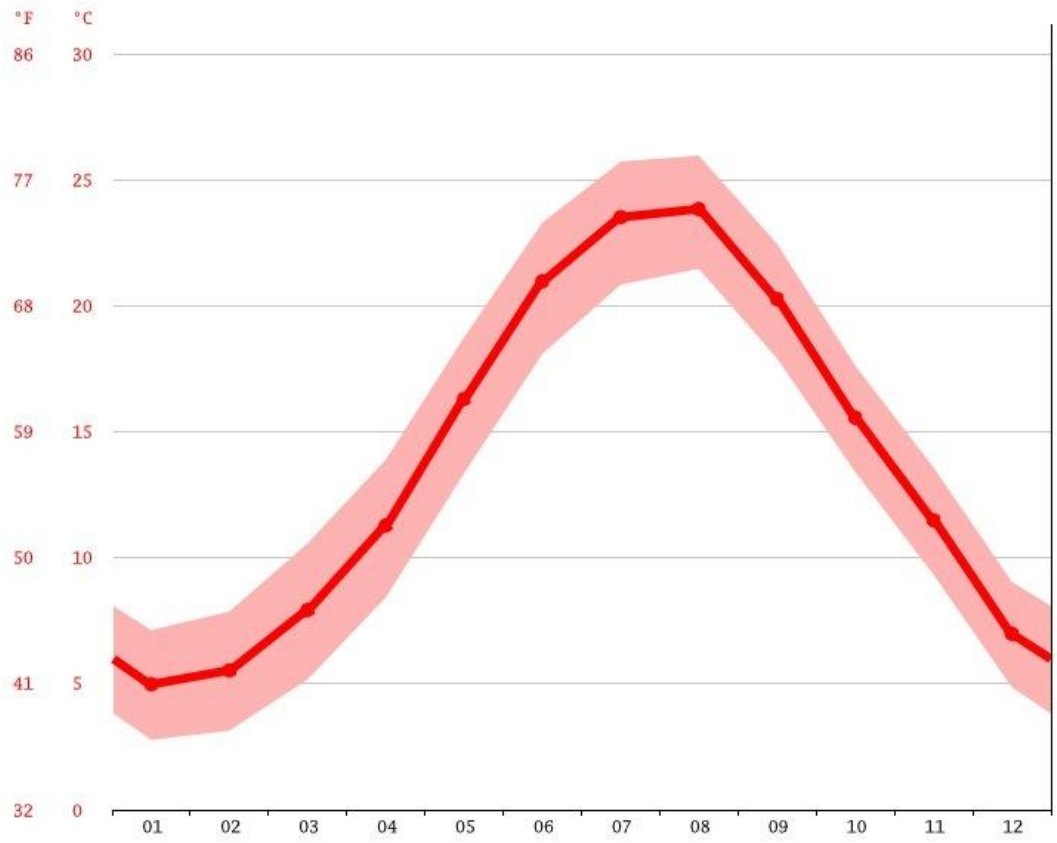

Рис.1.2.1 Средняя температура по месяцам в провинции Иглеада [7]

При температуре 23,8 °C Август - самый жаркий месяц в году. Средняя температура в январе составляет 5,0 °C, что является самым низким показателем года.

Дождь: Среднее количество осадков составляет 807 мм.

С осадками 32 мм август - самый засушливый месяц в году. Наибольшее количество осадков наблюдается в октябре со средним количеством осадков 112 мм.

1.3. Сейсмология

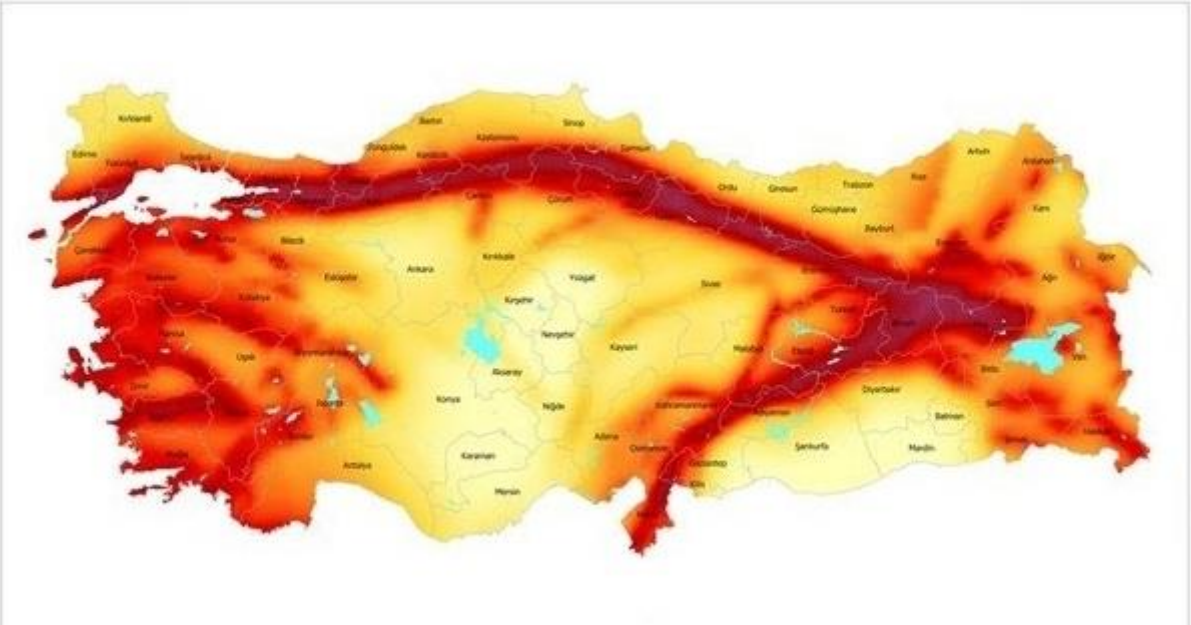

Рис.1.3. Карта зон сейсмической опасности Турции [8]

Наибольшая сейсмологическая активность в Турции наблюдается в красных районах. Сейсмологическая активность в провинции Иглеада находится на низком уровне, это не повлияет на безопасность АЭС.

1.4. Источник для системы водяного охлаждения

Провинция Игнеада находится на побережье Черного моря (см. рис.1.2). Это природная вода будет источником для системы водоохлаждения планируемой АЭС.

1.5. Выводы по главе 1.

Удовлетворяя всем условиям для строительства атомной электростанции, Игнеада занимает третье место в списке мест, выбранных для строительства атомной электростанции.

Атомные электростанции создадут рабочие места для людей здесь, что приведет к развитию экономических секторов в провинции в частности и в стране в целом, уменьшая экономическое неравенство в провинциях, но необходимо решить проблему миграции и расселения людей.

Достоинства:

- Расстояние от места размещения АЭС до административного центра провинции – 27 км.
- Природный источник воды для системы водоохлаждения.
- Активность сейсмологии находится на низком уровне, особенно серьезные стихийные бедствия, как землетрясение, цунами не происходят.

Глава 2. РАСЧЕТ ТЕПЛОВОЙ СХЕМЫ ЭНЕРГОБЛОКА АЭС С РЕАКТОРОМ ТИПА ВВЭР-1000

2.1. Общие характеристики атомной электростанции

Таблица 2.1.1

Общие характеристики атомной электростанции

Название	Значение	величина
Электрическая мощность АЭС нетто.	1000	МПа
Теплофикационная нагрузка.	250	Гкал/час
Номинальная температура теплоносителя 1-ого контура на выходе из реактора	320	^{0}C
Расчетная температура охлаждающей воды	20	^{0}C
Расчетная температура прямой сетевой воды	110	^{0}C
Тип парогенератора		Горизонтальный
Тип реактор		ВВЭР
Число оборотов турбины	1500	Об/мин
Тип привода питательного насоса		Электропривод

2.2. Основные теплотехнические параметры контура рабочего тела.

В этом разделе задачи было выполнено определение давления и температуры генерируемого пара, давления коденсатора и питательной воды на входе парагенератора. Все термодинамические свойства воды и водяного пара определены с помощью программы Water Steam Pro и справочников тепло-физических свойств воды и водяного пара [9, 10, 11].

1. Тепловая нагрузка с первым приближением.

$$Q_1 = \frac{N_{эл}}{\eta_{АЭС}} + Q_{тф} = \frac{1000}{0{,}33} + 291 = 3321 \text{ (МВт)}$$

Где: $Q_{тф}$ = 250 Гкал/ч = 291 МВт.

2. Температура теплоносителя на входе в реактор.

$T_2 = T_1 - \Delta T_{теп} = 320 - 30 = 290\ ^0C$

Где: $\Delta T_{теп} = 30\ ^0C$ (по анализу действия практического)

3. Расход теплоносителя первого контура.

$$G_{теп} = \frac{Q_1 \cdot \eta_у}{\Delta T_{теп} \cdot Ср_{теп}} = \frac{3321{,}14 \cdot 10^3 \cdot 0{,}998}{30 \cdot 5{,}5697} = 19836{,}5 \left(\frac{кг}{с}\right)$$

Где: $\eta_у$ = 0,998 (по анализу действия практического)

$$Ср_{теп} = f\left(16 \text{ МПа}; \frac{T_1 + T_2}{2} = \frac{290 + 320}{2} = 305\right) = 5{,}57 \left(\frac{кДж}{кг \cdot К}\right)$$

4. Температура воды на выходе без конденсатора.

$$t_{охл}^{вых} = t_{охл}^{вх} + \Delta t_{охл} = 20 + 10 = 30\ ℃$$

Где: $\Delta T_{охл} = 5 \div 10\ ^0C$, выбираю $\Delta T_{охл} = 10\ ^0C$.

5. Температура конденсаторы пара.

$$t_k^s = t_{охл}^{вых} + 5 \div 10 = 30 + 5 = 35\ ℃$$

Давление конденсаторы пар

$$P_k^s = f(t_k^s) = f(35) = 5{,}63(кПа)$$

6. Давление генерирующего пара с первым приближение.

P_{s1} = 6,5 Мпа

7. Номинальное значение температуры питательной воды.

$t_{пв} = 223\ ^0C$

8. Расход питательной воды.

$$G_{пв} = \frac{Q_1 \cdot \eta_{пг}}{h_п^{вых} - h_{пв}} = \frac{3321{,}17 \cdot 0{,}995}{2778{,}83 - 958{,}72} = 1821 \left(\frac{кг}{с}\right)$$

Где:

$$h_п^{вых} = h_s = f(P_{s1}) = f(6{,}5) = 2778{,}83 \left(\frac{кДж}{кг}\right)$$

$$h_{пв} = f(t_{пв}, P_2) = f(223℃; 7\ МПа) = 958{,}72 \left(\frac{кДж}{кг}\right)$$

$P_2 = P_{s1} + 0{,}5 = 6{,}5 + 0{,}5 = 7$ МПа.

$\eta_{пг} = 0{,}998$ - коэффициент удержания тепла.

9. Энтальпия генерирующего пара.

$$h_s = f(P_{s1}) = f(6{,}5) = 2778{,}83 \left(\frac{кДж}{кг}\right)$$

Все результаты приведение в таблице 2.1

Таблица 2.2

Основные теплотехнические параметры контура рабочего тела

Параметры	Значение	величина
Q_1	3321	МВт
T_2	290	^0C
$G_{теп}$	19836,5	кг/с
$t_{охл}^{вых}$	30	^0C
t_k^s	35	
P_k^s	5,63	кПа
P_{s1}	6,5	МПа
$t_{пв}$	223	^0C
$G_{пв}$	1821	кг/с
h_s	2778,83	кДж/кг

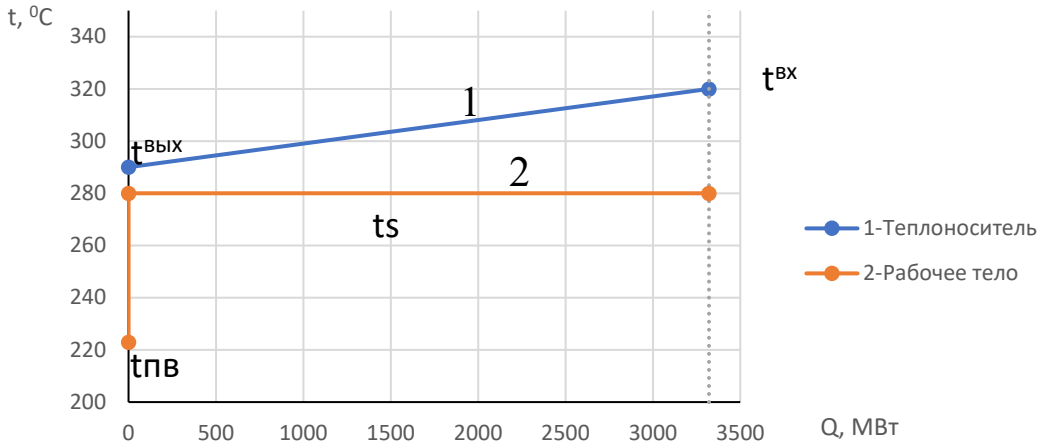

Рис. 2.1. T-Q диаграмма парагенератора ($\eta_{эл}$ = 33%).

2.3. Определение необходимое число регенерирующего подогреватели и давления пара.

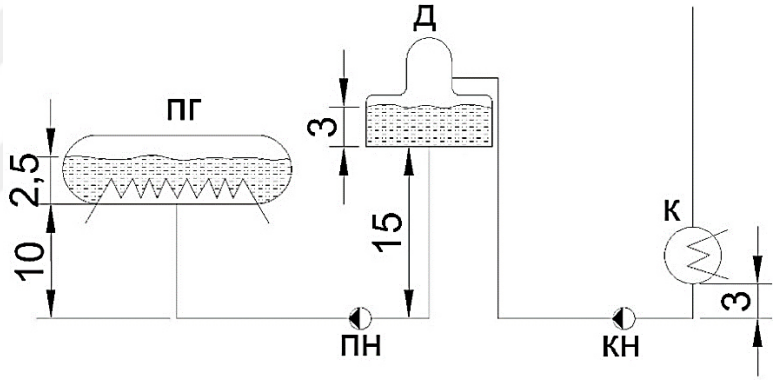

Рис. 2.2. Схема расположения ПГ, деаэратора и конденсатора.

Задачей раздела является определение количества регенеративных подогревателей и давления пара в отборах турбины. Расчёты выполняются на основе принятых температур питательной воды и конденсата.

1. Давление деаэратора.

Рд = 0,6 ÷ 1,2 МПа, выбираю Рд = 1 МПа.

2. Необходимый набор питательных насосов.

$$\Delta Р_{пн} = Р_{пг} – Р_д + \Delta Р_{пг} + \Delta Р_{птр} + \Delta Р_{рпк} + n*\Delta Р_{пвд} \pm \Delta Р_{нив}$$ [12]

Где:

ΔРпг = 0,5 МПа.

ΔРптр = 0,2 ÷ 0,3 МПа, выбираю ΔРптр = 0,3.

ΔРрпк = 1 МПа.

n = 2 (количество ПВД).

ΔРпвд = 0,4 МПа.

ΔРнив = ΔРразвыс – Δрурд + ΔРурпг.

$$\Delta Р\text{развыс} = \left(Н\text{пг} \cdot \rho_{\text{пг}}^{\text{вх}} - Н\text{д} \cdot \rho_{\text{д}}^{\text{вых}}\right) \cdot g$$

$$\Delta\text{рурд} = Н\text{урд} \cdot \rho_{\text{д}}^{\text{вых}} \cdot g$$

$$\Delta\text{рурпг} = Н\text{урпг} \cdot \rho_{\text{пг}} \cdot g$$

$$\rho_{\text{пг}}^{\text{вх}} = f(Р\text{пв}, t\text{пв}) = f(7{,}223) = 739{,}73\ \left(\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}\right)$$

$$\rho_{\text{д}}^{\text{вых}} = f(Р\text{д}) = f(1) = 887{,}11\left(\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}\right)$$

$$\rho_{\text{пг}} = f(Р_s^{\text{пг}}) = f(6{,}5) = 748{,}76\ \left(\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}\right)$$

Нд = 15 м.

Нпг = 10 м.

Нурпг = 2,5 м.

Нурд = 3 м.

$\Delta Р\text{развыс} = (10 \cdot 739{,}73 - 15 \cdot 887{,}11) \cdot 9{,}81 = -57970$ Па = -0,058 МПа.

$\Delta\text{рурд} = 3 \cdot 887{,}11 \cdot 9{,}81 = 26108$ Па $= 0{,}026$ МПа.

$\Delta\text{рурпг} = 2{,}5 \cdot 748{,}76 \cdot 9{,}81 = 18363$ Па $= 0{,}018$ МПа.

ΔРнив = -0,058 – 0,026 + 0,018 = -0,066 МПа.

ΔРпн = 6,5 – 1 + 0,5 + 0,3 + 1 + 2*0,4 – 0,066 = 8 МПа.

3. Необходимый набор конденсатора насоса.

$$\Delta Р\text{кн} = Р\text{д} - Р\text{к} + \Delta Р\text{оэ} + \Delta Р\text{ктр} + \Delta Р\text{ркк} + n*\Delta Р\text{пнд} \pm \Delta Р\text{нив} + \Delta Р_{\text{БОУ}}$$

Где:

ΔРоэ = 0,05 ÷ 0,07 МПа, выбираю ΔРоэ = 0,07.

ΔРктр = 0,1 ÷ 0,2 МПа, выбираю ΔРктр = 0,12.

ΔРркк = 0,3 МПа.

n = 4 (количество ПНД).

ΔРпнд = 0,15 МПа.

$\Delta P_{БОУ} = 0,3 \div 0,5$ МПа, выбираю $\Delta P_{БОУ} = 0,3$.

ΔРнив = ΔРразвыс – Δрурк + ΔРурд.

$$\Delta Рразвыс = \left(Нд \cdot \rho_{д}^{вх} - Нк \cdot \rho_{к}^{вых}\right) \cdot g$$

$$\Delta рурк = Нурк \cdot \rho_{к}^{вых} \cdot g$$

$$\Delta рурд = Нурд \cdot \rho_{д} \cdot g$$

Выбираем температуру на входе деаэратора равна 165 ^{0}C

$$\rho_{д}^{вх} = f(Рд, t_{вх}^{д}) = f(1,165) = 902,69 \left(\frac{кг}{м^3}\right)$$

$$\rho_{к}^{вых} = f(P_s^{к}) = f(0,00563) = 994 \left(\frac{кг}{м^3}\right)$$

$$\rho_{д} = f(P_s^{д}) = f(1) = 887,11 \left(\frac{кг}{м^3}\right)$$

Нд = 15 м.

Нк= 3 м.

Нурд = 3 м.

Нурк = 2 м.

$\Delta Рразвыс = (15 \cdot 902,69 - 3 \cdot 994) \cdot 9,81 = 10358$ Па = 0,104 МПа.

$\Delta рурд = 3 \cdot 887,11 \cdot 9,81 = 26108$ Па $= 0,026$ МПа.

$\Delta рурк = 2 \cdot 994 \cdot 9,81 = 19503$ Па $= 0,02$ МПа.

ΔРнив = 0,104 – 0,02 + 0,026 = 0,11 МПа.

ΔРкн = 1– 0,00563 + 0,07 + 0,15 + 0,3 + 4*0,15 + 0,11+ 0,3 = 2,5 МПа.

4. Определение нагрева воды насосов.

- Питательный насос

$$\Delta t_{пн} = \frac{\Delta P_{пн} \cdot \bar{v}_{пн}}{\eta_{пн} \cdot \overline{Cp}_{пн}}$$

Где:

$\Delta P_{пн} = P_{пн}^{вых} - P_{пн}^{вх} \Rightarrow P_{пн}^{вых} = P_{пн}^{вх} + \Delta P_{пн} = 1 + 8 = 9$ МПа.

$$\bar{\bar{v}}_{\text{пн}} = \frac{v_{\text{пн}}^{\text{вх}} + v_{\text{пн}}^{\text{вых}}}{2}$$

$$v_{\text{пн}}^{\text{вх}} = f(\text{P}_{\text{пн}}^{\text{вх}}, t_s^{\text{д}}) = f(1; 179{,}89) = 0{,}001127 \left(\frac{\text{м}^3}{\text{кг}}\right)$$

$$v_{\text{пн}}^{\text{вых}} = f(\text{P}_{\text{пн}}^{\text{вых}}, t_s^{\text{д}}) = f(9; 179{,}89) = 0{,}001021 \left(\frac{\text{м}^3}{\text{кг}}\right)$$

$$\bar{v}_{\text{пн}} = \frac{0{,}001127 + 0{,}001021}{2} = 0{,}001074 \left(\frac{\text{м}^3}{\text{кг}}\right)$$

$$\overline{\text{Ср}}_{\text{пн}} = \frac{\text{Ср}_{\text{пн}}^{\text{вх}} + \text{Ср}_{\text{пн}}^{\text{вых}}}{2}$$

$$\text{Ср}_{\text{пн}}^{\text{вх}} = f(\text{P}_{\text{пн}}^{\text{вх}}, t_s^{\text{д}}) = f(1; 179{,}89) = 4405 \left(\frac{\text{Дж}}{\text{кг. К}}\right)$$

$$\text{Ср}_{\text{пн}}^{\text{вых}} = f(\text{P}_{\text{пн}}^{\text{вых}}, t_s^{\text{д}}) = f(9; 179{,}89) = 4371 \left(\frac{\text{Дж}}{\text{кг. К}}\right)$$

$$\overline{\text{Ср}}_{\text{пн}} = \frac{4405 + 4374}{2} = 4388 \left(\frac{\text{Дж}}{\text{кг. К}}\right)$$

$\eta_{\text{пн}} = 0{,}8 \div 0{,}82$, выбираю $\eta_{\text{пн}} = 0{,}82$.

$$\Delta t_{\text{пн}} = \frac{\Delta \text{P}_{\text{пн}} \cdot \bar{v}_{\text{пн}}}{\eta_{\text{пн}} \cdot \overline{\text{Ср}}_{\text{пн}}} = \frac{8 \cdot 0{,}001074}{0{,}82 \cdot 4388} = 2{,}5°\text{C}$$

- Конденсаторный насос.

$$\Delta t_{\text{кн}} = \frac{\Delta \text{P}_{\text{кн}} \cdot \bar{v}_{\text{кн}}}{\eta_{\text{кн}} \cdot \overline{\text{Ср}}_{\text{кн}}}$$

Где:

$\Delta \text{P}_{\text{кн}} = \text{P}_{\text{кн}}^{\text{вых}} - \text{P}_{\text{кн}}^{\text{вх}} \Rightarrow \text{P}_{\text{кн}}^{\text{вых}} = \text{P}_{\text{кн}}^{\text{вх}} + \Delta \text{P}_{\text{кн}} = 0{,}0563 + 2{,}5 = 2{,}5$ МПа.

$$\bar{\bar{v}}_{\text{кн}} = \frac{v_{\text{кн}}^{\text{вх}} + v_{\text{кн}}^{\text{вых}}}{2}$$

$$v_{\text{кн}}^{\text{вх}} = f(\text{P}_{\text{кн}}^{\text{вх}}, t_s^{\text{к}}) = f(0{,}00563; 35) = 0{,}001006 \left(\frac{\text{м}^3}{\text{кг}}\right)$$

$$v_{\text{кн}}^{\text{вых}} = f(\text{P}_{\text{кн}}^{\text{вых}}, t_s^{\text{к}}) = f(2{,}5; 35) = 0{,}001005 \left(\frac{\text{м}^3}{\text{кг}}\right)$$

$$\bar{v}_{\text{кн}} = \frac{0{,}001006 + 0{,}001005}{2} = 0{,}001005 \left(\frac{\text{м}^3}{\text{кг}}\right)$$

$$\overline{\text{Ср}}_{\text{кн}} = \frac{\text{Ср}_{\text{кн}}^{\text{вх}} + \text{Ср}_{\text{кн}}^{\text{вых}}}{2}$$

$$\text{Ср}_{\text{кн}}^{\text{вх}} = f(\text{Р}_{\text{кн}}^{\text{вх}}, t_s^{\text{к}}) = f(0{,}00563; 35) = 4165 \left(\frac{\text{Дж}}{\text{кг. К}}\right)$$

$$\text{Ср}_{\text{кн}}^{\text{вых}} = f(\text{Р}_{\text{кн}}^{\text{вых}}, t_s^{\text{к}}) = f(2{,}5; 30) = 4173 \left(\frac{\text{Дж}}{\text{кг. К}}\right)$$

$$\overline{\text{Ср}}_{\text{пн}} = \frac{4165 + 4173}{2} = 4169 \left(\frac{\text{Дж}}{\text{кг. К}}\right)$$

$\eta_{\text{кн}} = 0{,}76 \div 0{,}78$, выбираю $\eta_{\text{пн}} = 0{,}76$.

$$\Delta t_{\text{кн}} = \frac{\Delta \text{Р}_{\text{пн}} \cdot \bar{v}_{\text{пн}}}{\eta_{\text{пн}} \cdot \overline{\text{Ср}}_{\text{пн}}} = \frac{2{,}5 \cdot 0{,}001006}{0{,}76 \cdot 4169} = 1℃$$

5. Требование количества подогреватели низкого давления.

$$n_{\text{ПНД}} = \frac{t_s^{\text{д}} - t_s^{\text{к}} - \Delta t_{\text{э}} - \Delta t_{\text{кн}} - \Delta t_{\text{д}}}{\Delta t_{\text{ПНД}}}$$

Где:

$\Delta t_{\text{э}} = 5$ ℃

$\Delta t_{\text{кн}} = 2$ ℃

$\Delta t_{\text{д}} = 15 \div 20$ ℃, выбираю $\Delta t_{\text{д}} = 15$℃.

$\Delta t_{\text{ПНД}} = 25 \div 30$℃, выбираю $\Delta t_{\text{ПНД}} = 30$℃.

$$n_{\text{ПНД}} = \frac{179{,}89 - 35 - 5 - 2 - 20}{30} = 4{,}13 \approx 4.$$

6. Требование количества подогреватели высокого давления.

$$n_{\text{ПВД}} = \frac{t_{\text{пв}} - t_s^{\text{д}} - \Delta t_{\text{пн}}}{\Delta t_{\text{ПВД}}}$$

Где:

$\Delta t_{\text{пн}} = 3$ ℃

$\Delta t_{\text{ПВД}} = 18 \div 22$ ℃, выбираю $\Delta t_{\text{ПВД}} = 19$℃.

$$n_{\text{ПВД}} = \frac{223 - 179{,}89 - 3}{19} = 2{,}13 \approx 2.$$

7. Температура основного конденсатора на входе каждый ПНД.

7.1Температура на входе ПНД1.

$$t_{\text{ПНД1\_вх}}^{\text{ок}} = t_{\text{кн}}^{\text{вых}} + \Delta t_{\text{оэ}}^{\text{ок}} = 36 + 5 = 41℃$$

Где:

$t_{\text{кн}}^{\text{вых}} = t_{\text{ок}}^{\text{вых}} + \Delta t_{\text{кн}} = 35 + 1 = 36℃$

$\Delta t_{\text{оэ}}^{\text{ок}} = 5℃$

7.2Температура на входе ПНД2.

$$t_{\text{ПНД2\_вх}}^{\text{ок}} = t_{\text{ПНД1\_вх}}^{\text{ок}} + \Delta t_{\text{ПНД}}^{\text{ок}} = 41 + 30 = 71℃$$

7.3Температура на входе ПНД3.

$$t_{\text{ПНД3\_вх}}^{\text{ок}} = t_{\text{ПНД2\_вх}}^{\text{ок}} + \Delta t_{\text{ПНД}}^{\text{ок}} = 71 + 30 = 101℃$$

7.4Температура на входе ПНД4.

$$t_{\text{ПНД4\_вх}}^{\text{ок}} = t_{\text{ПНД3\_вх}}^{\text{ок}} + \Delta t_{\text{ПНД}}^{\text{ок}} = 101 + 30 = 131℃$$

8. Температура питательной воды на входе каждый ПВД.

8.1Температура питательной воды на входе ПВД1.

$$t_{\text{ПВД1\_вх}}^{\text{ПВ}} = t_{\text{д}}^{s} + \Delta t_{\text{пн}} = 180 + 2{,}5 = 182{,}5℃$$

8.2Температура питательной воды на входе ПВД2.

$$t_{\text{ПВД2\_вх}}^{\text{ПВ}} = t_{\text{ПВД2\_вх}}^{\text{ПВ}} + \Delta t_{\text{ПВД}} = 182{,}5 + 19 = 201{,}5℃$$

9. Требование конденсации греющего пара для каждого ПВД.

9.1Требование конденсации греющего пара ПВД2.

Температура насыщение ПВД2:

$$t_{\text{ПВД2}}^{s} = t_{\text{ПВД2}}^{\text{вых}} + \delta t_{\text{ПВД}} = 220{,}5 + 3 = 223{,}5℃$$

Давление насыщение ПВД2:

$$\text{P}_{\text{ПВД2}}^{s} = f\left(t_{\text{ПВД2}}^{s}\right) = f(223{,}5) = 2{,}48 \text{ МПа}$$

Давление отбора относительно ПВД2:

$$\text{P}_1 = \text{P}_{\text{ПВД2}}^{\text{об}} = \frac{\text{P}_{\text{ПВД2}}^{s}}{1 - \Delta\text{P}_{\text{ПВД}}^{\text{г}_\text{в}}} = \frac{2{,}48}{1 - 0{,}03} = 2{,}56 \text{ МПа}$$

Где:

$\Delta\text{P}_{\text{ПВД}}^{\text{г}_i} = \frac{11 - \text{г}_i}{100}$ – номер подогревателя по ходу воды относительно ПВД

9.2 Требование конденсации греющего пара ПВД1.

Температура насыщение ПВД1:

$$t^{s}_{\text{ПВД1}} = t^{\text{вых}}_{\text{ПВД1}} + \delta t_{\text{ПВД}} = 201{,}5 + 3 = 204{,}5℃$$

Давление насыщение ПВД1:

$$\text{P}^{s}_{\text{ПВД1}} = f\left(t^{s}_{\text{ПВД1}}\right) = f(204{,}5) = 1{,}71 \text{ МПа}$$

Давление отбора относительно ПВД1:

$$\text{P}_2 = \text{P}^{\text{об}}_{\text{ПВД1}} = \frac{\text{P}^{s}_{\text{ПВД1}}}{1 - \Delta\text{P}^{\text{г7}}_{\text{ПВД}}} = \frac{1{,}71}{1 - 0{,}04} = 1{,}78 \text{ МПа}$$

9.3 Требование конденсации греющего пара по ходу к деаэратору.

Давление насыщение деаэратора:

$$\text{P}_{\text{д}} = 1 \text{ МПа}$$

Давление отбора относительно деаэратора:

$$\text{P}_3 = \text{P}^{\text{об}}_{\text{д}} = \frac{\text{P}_{\text{д}}}{1 - \Delta\text{P}^{\text{г6}}_{\text{Д}}} = \frac{1}{1 - 0{,}05} = 1{,}05 \text{ МПа}$$

9.4 Требование конденсации греющего пара ПНД4.

Температура насыщение ПНД4:

$$t^{s}_{\text{ПНД4}} = t^{\text{вых}}_{\text{ПНД4}} + \delta t_{\text{ПНД}} = 161 + 3 = 164℃$$

Давление насыщение ПНД4:

$$\text{P}^{s}_{\text{ПНД4}} = f\left(t^{s}_{\text{ПНД4}}\right) = f(164) = 0{,}68 \text{ МПа}$$

Давление отбора относительно ПНД4:

$$\text{P}_4 = \text{P}^{\text{об}}_{\text{ПНД4}} = \frac{\text{P}^{s}_{\text{ПНД4}}}{1 - \Delta\text{P}^{\text{г5}}_{\text{ПНД}}} = \frac{0{,}68}{1 - 0{,}06} = 0{,}73 \text{ МПа}$$

9.5 Требование конденсации греющего пара ПНД3.

Температура насыщение ПНД3:

$$t^{s}_{\text{ПНД3}} = t^{\text{вых}}_{\text{ПНД3}} + \delta t_{\text{ПНД}} = 131 + 5 = 136℃$$

Давление насыщение ПНД3:

$$\text{P}^{s}_{\text{ПНД3}} = f\left(t^{s}_{\text{ПНД3}}\right) = f(136) = 0{,}32 \text{ МПа}$$

Давление отбора относительно ПНД3:

$$P_5 = P^{об}_{ПНД3} = \frac{P^{s}_{ПНД3}}{1 - \Delta P^{г_4}_{ПНД}} = \frac{0{,}32}{1 - 0{,}07} = 0{,}35 \text{ МПа}$$

9.6 Требование конденсации греющего пара ПНД2.

Температура насыщение ПНД2:

$$t^{s}_{ПНД2} = t^{вых}_{ПНД2} + \delta t_{ПНД} = 101 + 5 = 106℃$$

Давление насыщение ПНД2:

$$P^{s}_{ПНД2} = f\left(t^{s}_{ПНД2}\right) = f(106) = 0{,}13 \text{ МПа}$$

Давление отбора относительно ПНД2:

$$P_6 = P^{об}_{ПНД2} = \frac{P^{s}_{ПНД2}}{1 - \Delta P^{г_3}_{ПНД}} = \frac{0{,}13}{1 - 0{,}08} = 0{,}14 \text{ МПа}$$

9.7 Требование конденсации греющего пара ПНД1.

Температура насыщение ПНД1:

$$t^{s}_{ПНД1} = t^{вых}_{ПНД1} + \delta t_{ПНД} = 71 + 5 = 76℃$$

Давление насыщение ПНД1:

$$P^{s}_{ПНД1} = f\left(t^{s}_{ПНД1}\right) = f(76) = 0{,}04 \text{ МПа}$$

Давление отбора относительно ПНД1:

$$P_7 = P^{об}_{ПНД1} = \frac{P^{s}_{ПНД1}}{1 - \Delta P^{г_2}_{ПНД}} = \frac{0{,}04}{1 - 0{,}09} = 0{,}044 \text{ МПа}$$

9.8 Требование конденсации греющего пара по ходу к конденсатору.

Давление насыщение конденсатора:

$$P_к = 5{,}63 \text{ кПа}$$

Давление отбора относительно деаэратора:

$$P_8 = P^{об}_{к} = \frac{P_к}{1 - \Delta P^{г_1}_{К}} = \frac{5{,}63}{1 - 0{,}1} = 6{,}22 \text{ кПа}$$

2.4. Расчет процесса расширения пара прямоточной части турбина.

Для расчёта процесса расширения необходимо располагать внутренними КПД отсеков. Эти показатели, приведенные в литературе, получены при перегретом паре.

Параметры для типов реактора в таблице 2.3

Таблица 2.3

Параметры для типов реактора [11]

Тип турбо установки	Цилиндр турбо установки	$\eta_{0i}^{\text{сух}}$	$\text{К}_\text{В}$
Насыщение пара (вер., гор.)	ЦВД	$0{,}86 \div 0{,}92$	$0{,}1 \div 0{,}5$
	ЦНД	$0{,}8 \div 0{,}95$	$0{,}2 \div 0{,}6$

1. Давление пара на вход СРК турбина.

$$\text{Р}_0 = \text{Р}_{\text{пг}}^{\text{вых}} \frac{100 - \delta\text{Р}_{\text{ппр}}}{100} = 6{,}5 \frac{100 - 5}{100} = 6{,}18 \text{ МПа}$$

Где:

$\delta\text{Р}_{\text{ппр}} = 5\%$

2. Давление пара перед СРК турбина.

$$\text{Р}_0' = \text{Р}_0 \frac{100 - \delta\text{Р}_{\text{СРК}}}{100} = 6{,}18 \frac{100 - 4}{100} = 5{,}93 \text{ МПа}$$

Где:

$\delta\text{Р}_{\text{СРК}} = 3{,}5 \div 5\%$ выбираем $\delta\text{Р}_{\text{СРК}} = 4\%$

Энтальпия на вход ЦВД:

$$h_0' = h_0 = h_{\text{пг}}^{\text{вых}} = f(\text{Р}_{\text{пг}}^{\text{вых}}) = f(6{,}5) = 2778{,}83 \left(\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}\right)$$

3. Энтропия выход из ЦВД по ходу 1 (ПВД2): (смотрим рис. 3)

$$S_0 = f(\text{Р}_0'; h_0') = f(5{,}93; 2778{,}83) = 5{,}884 \left(\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}\right)$$

4. Энтальпия идеальная из выхода по ходу 1 (ПВД2):

$$h_{1\text{a}} = f(\text{Р}_1; S_0) = f(2{,}56; 5{,}884) = 2621 \left(\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}\right)$$

5. Энтальпия сухая по ходу 1 (ПВД2):

$$h_1^{\text{сух}} = h_0' - \eta_{01}^{\text{сух}} \cdot (h_0' - h_{1\text{а}}) = 2778{,}83 - 0{,}9 \cdot (2778{,}83 - 2621)$$
$$= 2636{,}8 \left(\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}\right)$$

Из таблицы 1 выбираем $\eta_{01}^{\text{сух}} = 0{,}9$.

6. Влажность по ходу 1 (ПВД2):

$$y_1 = f\left(\text{Р}_1; h_1^{\text{сух}}\right) = f(2{,}56; 2636{,}8) = 0{,}09$$

7. КПД влажности по ходу 1 (ПВД2):

$$\eta_{01}^{\text{вл}} = \eta_{01}^{\text{сух}} \cdot (1 - \text{К}_\text{В} \cdot y_1) = 0{,}9 \cdot (1 - 0{,}5 \cdot 0{,}09) = 0{,}86.$$

Из таблицы 1 выбираем $\text{К}_\text{В} = 0{,}5$

8. Влажная энтальпия по ходу 1 (ПВД2):

$$h_1 = h_0' - \eta_{0i}^{\text{вл}} \cdot (h_0' - h_{1\text{а}}) = 2778{,}83 - 0{,}86 \cdot (2778{,}83 - 2621)$$
$$= 2643{,}2 \left(\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}\right)$$

9. Энтропия выход из ЦВД по ходу 2 (ПВД1): (смотрим рис. 5)

$$S_1 = f(\text{Р}_1; h_1) = f(2{,}56; 2643{,}2) = 5{,}928 \left(\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}\right)$$

10. Энтальпия идеальная из выхода по ходу 2 (ПВД1):

$$h_{2\text{а}} = f(\text{Р}_2; S_1) = f(1{,}78; 5{,}928) = 2578 \left(\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}\right)$$

11. Энтальпия сухая по ходу 2 (ПВД1):

$$h_2^{\text{сух}} = h_1 - \eta_{02}^{\text{сух}} \cdot (h_1 - h_{2\text{а}}) = 2643{,}2 - 0{,}9 \cdot (2643{,}2 - 2578)$$
$$= 2584{,}5 \left(\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}\right)$$

Из таблицы 1 выбираем $\eta_{02}^{\text{сух}} = 0{,}9$.

12. Влажность по ходу 2 (ПВД1):

$$y_2 = f\left(\text{Р}_2; h_2^{\text{сух}}\right) = f(1{,}78; 2584{,}5\ ) = 0{,}11$$

13. КПД влажности по ходу 2 (ПВД1):

$$\eta_{02}^{\text{вл}} = \eta_{02}^{\text{сух}} \cdot (1 - \text{К}_\text{В} \cdot y_2) = 0{,}9 \cdot (1 - 0{,}5 \cdot 0{,}11) = 0{,}85.$$

Из таблицы 1 выбираем $\text{К}_\text{В} = 0{,}5$

14. Влажная энтальпия по ходу 2 (ПВД1):

$$h_2 = h_1 - \eta_{02}^{\text{вл}} \cdot (h_1 - h_{2\text{a}}) = 2643{,}2 - 0{,}85 \cdot (2643{,}2 - 2578)$$
$$= 2587{,}7 \left(\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}\right)$$

15.Энтропия выход из ЦНД по ходу 3 (Д): (смотрим рис. 5)

$$S_2 = f(\text{Р}_2; h_2) = f(1{,}78; 2587{,}7) = 5{,}949 \left(\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}\right)$$

16.Энтальпия идеальная на входе по ходу 3 (Д):

$$h_{3\text{a}} = f(\text{Р}_3; S_2) = f(1{,}05; 5{,}949) = 2497 \left(\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}\right)$$

17.Энтальпия сухая по ходу 3 (Д):

$$h_3^{\text{сух}} = h_2 - \eta_{03}^{\text{сух}} \cdot (h_2 - h_{3\text{a}}) = 2587{,}7 - 0{,}9 \cdot (2587{,}7 - 2497)$$
$$= 2506{,}1 \left(\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}\right)$$

Из таблицы 1 выбираем $\eta_{03}^{\text{сух}} = 0{,}9$.

18. Влажность по ходу 3 (Д):

$$y_3 = f\left(\text{Р}_3; h_3^{\text{сух}}\right) = f(1{,}05; 2506{,}1) = 0{,}136$$

19.КПД влажности по ходу 3 (Д):

$$\eta_{03}^{\text{вл}} = \eta_{03}^{\text{сух}} \cdot (1 - \text{К}_\text{В} \cdot y_3) = 0{,}9 \cdot (1 - 0{,}5 \cdot 0{,}136) = 0{,}84.$$

Из таблицы 1 выбираем $\text{К}_\text{В} = 0{,}5$

20.Влажная энтальпия по ходу 3 (Д):

$$h_3 = h_2 - \eta_{03}^{\text{вл}} \cdot (h_2 - h_{3\text{a}}) = 2587{,}7 - 0{,}84 \cdot (2587{,}7 - 2497)$$
$$= 2511{,}6 \left(\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}\right)$$

21.Энтропия выход из ЦНД по ходу 4 (ПНД4): (смотрим рис. 5)

$$S_3 = f(\text{Р}_3; h_3) = f(1{,}05; 2511{,}6) = 5{,}981 \left(\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}\right)$$

22.Энтальпия идеальная по ходу 4 (ПНД4):

$$h_{4\text{a}} = f(\text{Р}_4; S_3) = f(0{,}73; 5{,}981) = 2450{,}7 \left(\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}\right)$$

23.Энтальпия сухая по ходу 4 (ПНД4):

$$h_4^{\text{сух}} = h_3 - \eta_{04}^{\text{сух}} \cdot (h_3 - h_{4\text{а}}) = 2511{,}6 - 0{,}9 \cdot (2511{,}6 - 2450{,}7)$$
$$= 2456{,}8 \left(\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}\right)$$

Из таблицы 1 выбираем $\eta_{0\text{з}}^{\text{сух}} = 0{,}9$.

24. Влажность по ходу 4 (ПНД4):

$$y_4 = f\left(\text{Р}_4; h_4^{\text{сух}}\right) = f(0{,}73; 2456{,}8) = 0{,}15$$

25.КПД влажности по ходу 4 (ПНД4):

$$\eta_{04}^{\text{вл}} = \eta_{04}^{\text{сух}} \cdot (1 - \text{К}_\text{В} \cdot y_4) = 0{,}9 \cdot (1 - 0{,}5 \cdot 0{,}15) = 0{,}83.$$

Из таблицы 1 выбираем $\text{К}_\text{В} = 0{,}5$

26.Влажная энтальпия по ходу 4 (ПНД4):

$$h_4 = h_3 - \eta_{04}^{\text{вл}} \cdot (h_3 - h_{4\text{а}}) = 2511{,}6 - 0{,}83 \cdot (2511{,}6 - 2450{,}7)$$
$$= 2460{,}9 \left(\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}\right)$$

27.Потери давления в сепараторе.

$$\Delta\text{Р}_{\text{сеп}} = 0{,}04 \cdot \text{Р}_4 = 0{,}04 \cdot 0{,}73 = 0{,}029 \text{ МПа}$$

28.Потери давления в перегревах пара.

$$n \cdot \Delta\text{Р}_{\text{пп}} = n \cdot 0{,}01 \cdot (\text{Р}_4 - \Delta\text{Р}_{\text{сеп}}) = 2 \cdot 0{,}01 \cdot (0{,}73 - 0{,}029) = 0{,}014 \text{ МПа}$$

n = 2 так как у нас два перегрев пара.

29. Потери давления в отсечной задвижке.

$$\Delta\text{Р}_{\text{оз}} = 0{,}02 \cdot (\text{Р}_4 - \Delta\text{Р}_{\text{сеп}} - n \cdot \Delta\text{Р}_{\text{пп}}) = 0{,}02 \cdot (0{,}73 - 0{,}029 - 0{,}014)$$
$$= 0{,}014 \text{ МПа}$$

30.Давление пара на входе ЦНД:

$$\text{Р}_{\text{ЦНД}}^{\text{вх}} = \text{Р}_4 - \Delta\text{Р}_{\text{сеп}} - n \cdot \Delta\text{Р}_{\text{пп}} - \Delta\text{Р}_{\text{оз}} = 0{,}73 - 0{,}029 - 0{,}014 - 0{,}014$$
$$= 0{,}67 \text{ МПа}$$

31.Оптимальная температура напора перегрева пара.

$$\delta t_{\text{пп}} = 20 \text{ -}25\ ^0\text{C}$$

температура пара на входе ЦНД:

$$t_{\text{ЦНД}}^{\text{вх}} = t_{\text{пп}}^{\text{вых}} = t_{\text{пг}}^{\text{вых}} - \delta t_{\text{пп}} = 280{,}8 - 20 = 260{,}85\ ℃$$

Энтальпия пара на входе ЦНД:

$$h_{\text{ЦНД}}^{\text{вх}} = h_{\text{пп2}}^{\text{вых}} = f\left(\text{P}_{\text{ЦНД}}^{\text{вх}}; t_{\text{ЦНД}}^{\text{вх}}\right) = f(0{,}67: 260{,}86) = 2978{,}1\left(\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}\right)$$

32.Энтропия выход из ЦНД по ходу 5 (ПНД3): (смотрим рис. 3)

$$S_4 = f\left(\text{P}_{\text{ЦНД}}^{\text{вх}}; h_{\text{ЦНД}}^{\text{вх}}\right) = f(0{,}67; 2978{,}1) = 7{,}172\ \left(\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}\right)$$

33.Энтальпия идеальная по ходу 5 (ПНД3): (смотрим рис. 3)

$$h_{5\text{a}} = f(\text{P}_5; S_4) = f(0{,}35; 7{,}172) = 2830{,}7\ \left(\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}\right)$$

34.Энтальпия сухая по ходу 5 (ПНД3):

$$h_5^{\text{сух}} = h_{\text{ЦНД}}^{\text{вх}} - \eta_{05}^{\text{сух}} \cdot \left(h_{\text{ЦНД}}^{\text{вх}} - h_{5\text{a}}\right) = 2978{,}1 - 0{,}8 \cdot (2978{,}1 - 2830{,}7)$$

$$= 2860{,}2\ \left(\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}\right)$$

Из таблицы 1 выбираем $\eta_{05}^{\text{сух}} = 0{,}8$.

35. Влажность по ходу 5 (ПНД3):

$$y_5 = f\left(\text{P}_5; h_5^{\text{сух}}\right) = f(0{,}35; 2860{,}2\ ) = 0$$

Мы получим, что $y_5 = 0$, это значит греющий пар полного сухого.

$$h_5 = h_5^{\text{сух}} = 2860{,}2\ \left(\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}\right)$$

36.Энтропия выход из ЦНД по ходу 6 (ПНД2): (смотрим рис. 5)

$$S_5 = f(\text{P}_5; h_5) = f(0{,}35; 2860{,}2\ ) = 7{,}235\left(\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}\right)$$

37.Энтальпия идеальная по ходу 6 (ПНД2):

$$h_{6\text{a}} = f(\text{P}_6; S_5) = f(0{,}14; 7{,}235) = 2680{,}9\ \left(\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}\right)$$

38.Энтальпия сухая по ходу 6 (ПНД2):

$$h_6^{\text{сух}} = h_5 - \eta_{06}^{\text{сух}} \cdot (h_5 - h_{6\text{а}}) = 2860{,}2 - 0{,}8 \cdot (2860{,}2 - 2680{,}9)$$
$$= 2716{,}8 \left(\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}\right)$$

Из таблицы 1 выбираем $\eta_{06}^{\text{сух}} = 0{,}8$.

39. Влажность по ходу 6 (ПНД2):

$$y_6 = f\left(\text{Р}_6; h_6^{\text{сух}}\right) = f(0{,}14; 2716{,}8\ ) = 0$$

Мы получим, что $y_6 = 0$, это значит греющий пар полного сухого.

$$h_6 = h_6^{\text{сух}} = 2716{,}8 \left(\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}\right)$$

40.Энтропия выход из ЦНД по ходу 7 (ПНД1): (смотрим рис. 5)

$$S_6 = f(\text{Р}_6; h_6) = f(0{,}14; 2716{,}8\ ) = 7{,}328 \left(\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}\right)$$

41.Энтальпия идеальная по ходу 7 (ПНД1):

$$h_{7\text{а}} = f(\text{Р}_7; S_6) = f(0{,}044; 7{,}328) = 2532{,}2 \left(\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}\right)$$

42.Энтальпия сухая по ходу 7 (ПНД1):

$$h_7^{\text{сух}} = h_6 - \eta_{07}^{\text{сух}} \cdot (h_6 - h_{7\text{а}}) = 2716{,}8 - 0{,}8 \cdot (2716{,}8 - 2532{,}2)$$
$$= 2569{,}1 \left(\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}\right)$$

Из таблицы 1 выбираем $\eta_{07}^{\text{сух}} = 0{,}8$.

43. Влажность по ходу 7 (ПНД1):

$$y_7 = f\left(\text{Р}_7; h_7^{\text{сух}}\right) = f(0{,}044; 2569{,}1) = 0{,}03$$

44.КПД влажности по ходу 7 (ПНД1):

$$\eta_{07}^{\text{вл}} = \eta_{07}^{\text{сух}} \cdot (1 - \text{К}_\text{В} \cdot y_6) = 0{,}8 \cdot (1 - 0{,}6 \cdot 0{,}03) = 0{,}79.$$

Из таблицы 1 выбираем $\text{К}_\text{В} = 0{,}6$

45.Влажная энтальпия по ходу 7 (ПНД1):

$$h_7 = h_6 - \eta_{07}^{\text{вл}} \cdot (h_6 - h_{7\text{а}}) = 2716{,}8 - 0{,}79 \cdot (2716{,}8 - 2532{,}2)$$
$$= 2571{,}8 \left(\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}\right)$$

46.Энтропия выход из ЦНД по ходу 8 (К): (смотрим рис. 5)

$$S_7 = f(\mathrm{P}_7; h_7) = f(0{,}044; 2571{,}8\ ) = 7{,}441 \left(\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}\right)$$

47.Энтальпия идеальная по ходу 8 (К):

$$h_{8\text{а}} = f(\mathrm{P}_8; S_7) = f(0{,}0062; 7{,}441) = 2296{,}5 \left(\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}\right)$$

48.Энтальпия сухая по ходу 8 (К):

$$h_8^{\text{сух}} = h_7 - \eta_{08}^{\text{сух}} \cdot (h_7 - h_{8\text{а}}) = 2571{,}8 - 0{,}8 \cdot (2571{,}8 - 2296{,}5)$$

$$= 2351{,}5 \left(\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}\right)$$

Из таблицы 1 выбираем $\eta_{08}^{\text{сух}} = 0{,}8$.

49. Влажность по ходу 8 (К):

$$y_8 = f\left(\mathrm{P}_8; h_8^{\text{сух}}\right) = f(0{,}0061; 2351{,}5\ ) = 0{,}085$$

50.КПД влажности по ходу 8 (К):

$$\eta_{08}^{\text{вл}} = \eta_{08}^{\text{сух}} \cdot (1 - \mathrm{К}_\mathrm{В} \cdot y_6) = 0{,}8 \cdot (1 - 0{,}6 \cdot 0{,}085) = 0{,}76.$$

Из таблицы 1 выбираем $\mathrm{К}_\mathrm{В} = 0{,}6$

51.Влажная энтальпия по ходу 8 (К):

$$h_8 = h_8 - \eta_{08}^{\text{вл}} \cdot (h_7 - h_{8\text{а}}) = 2571{,}8 - 0{,}76 \cdot (2571{,}8 - 2296{,}5) =$$

$2363{,}4 \left(\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}\right)$ [13]

Результаты представлены в таблице 2.4.

Таблица 2.4

Давления и температуры в подогревателях

№ отбора	Давление, МПа	Энтальпия, кДж/кг	$\eta_{0i}^{сух}$	$\eta_{0i}^{вл}$	у, %	$К_В$
1 (ПВД2)	2,56	2647,5	0,9	0,86	8,7	0,5
2 (ПВД1)	1,78	2587,74	0,9	0,85	10,9	0,5
3 Деаэратор (Д)	1,05	2511,6	0,9	0,84	13,3	0,5
4 (ПНД4)	0,73	2460,91	0,9	0,83	14,7	0,5
5 (ПНД3)	0,35	2860,18	0,8	-	-	-
6 (ПНД2)	0,14	2716,76	0,8	-	-	-
7 ((ПНД1)	0,044	2571,78	0,8	0,79	3	0,6
8 конденсатор (К)	0,0062	2363,42	0,8	0,76	9	0,6

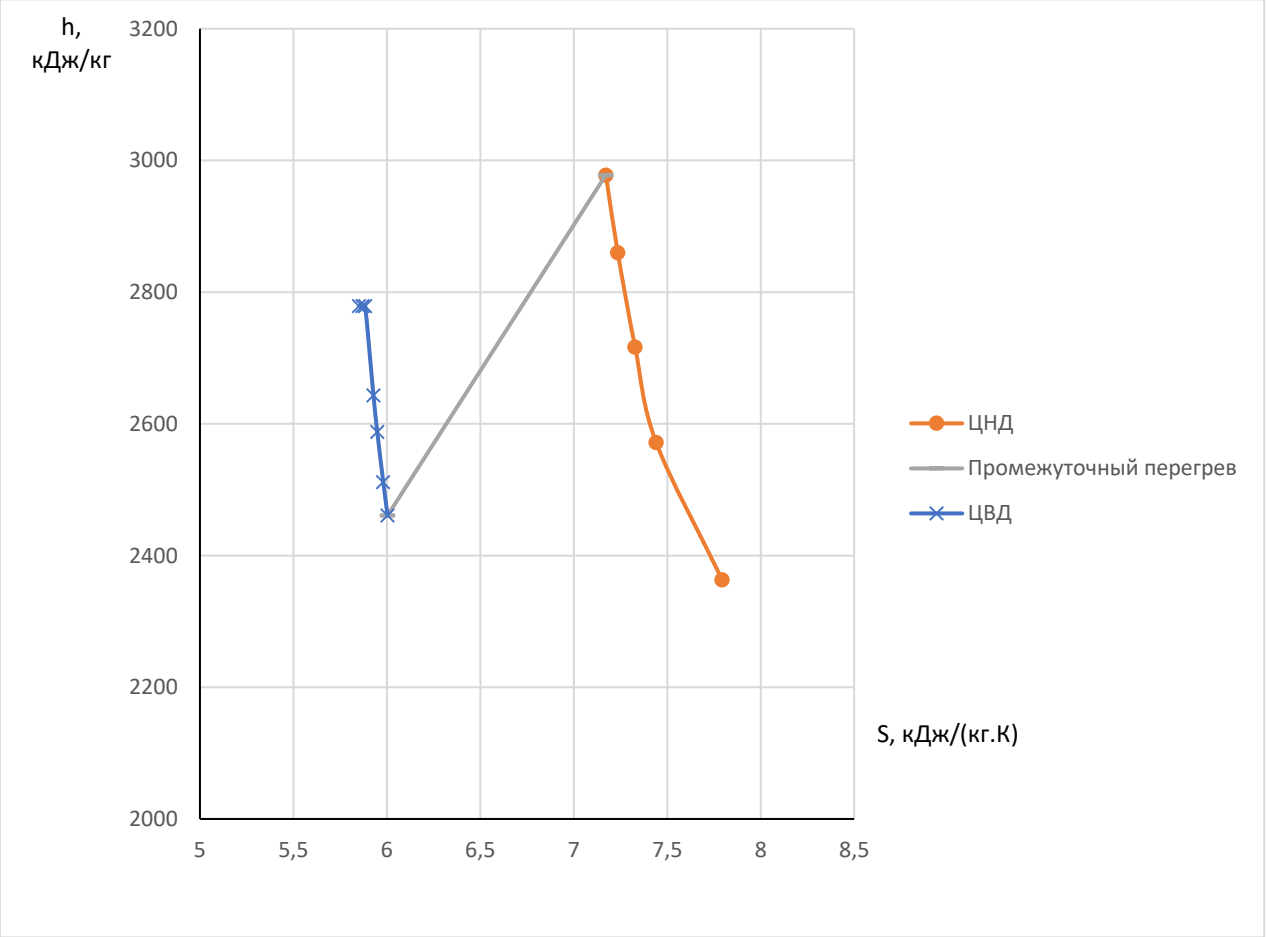

Рис. 2.3. H-S диаграмм процесса расширения пара в турбине ($\eta_{эл}$ = 33%).

2.5. Расчет подогреватели сетевой воды

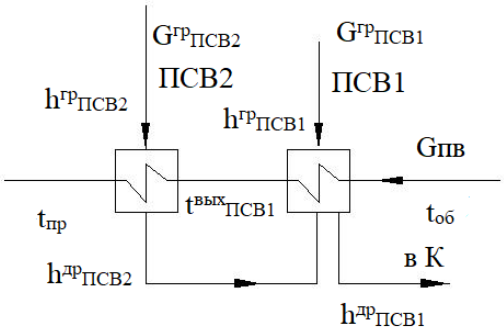

Рис. 2.4. Принципиальная тепловая схема ПСВ.

Необходимо определить давления и расходы греющего пара на каждый подогреватель сетевой воды и температуры на выходе из каждого подогревателя.

1. Расход сетевой воды.

$$G_{\text{св}} = \frac{Q_{\text{тф}}}{\text{Ср}_{\text{св}} \cdot (t_{\text{пр}} - t_{\text{об}})} = \frac{291 \cdot 10^3}{4{,}203 \cdot (110 - 70)} = 1730 \left(\frac{\text{кг}}{\text{с}}\right)$$

Где:

$Q_{\text{тф}} = 291$ МВт дано на части 1.

$t_{\text{об}} = 70$ ℃ (из практически)

$$\text{Ср}_{\text{св}} = f\left(\text{Р}_{\text{св}}; \frac{t_{\text{пр}} + t_{\text{об}}}{2}\right) = f(1; 90) = 4{,}203 \left(\frac{\text{кДж}}{\text{кг·К}}\right)$$

($\text{Р}_{\text{св}} = 1$ МПа из практически)

2. Температура из выхода ПСВ1:

$$t_{\text{ПСВ1}}^{\text{вых}} = t_{\text{об}} + \frac{t_{\text{пр}} - t_{\text{об}}}{2} = 70 + \frac{110 - 70}{2} = 90 \text{ ℃}$$

3. Температура греющего пара на входе ПСВ:

3.1 Температура греющего пара на входе ПСВ2.

$$t_{\text{ПСВ2}}^{S} = t_{\text{ПСВ2}}^{\text{вых}} + \delta t_{\text{ПСВ}} = 110 + 5 = 115 \text{ ℃}$$

3.2 Температура греющего пара на входе ПСВ1.

$$t_{\text{ПСВ1}}^{S} = t_{\text{ПСВ1}}^{\text{вых}} + \delta t_{\text{ПСВ}} = 90 + 5 = 95 \text{ ℃}$$

4. Давление греющего пара:

4.1 Давление греющего пара ПСВ2:

$$\mathrm{P}^{s}_{\text{ПСВ2}} = f(t^{s}_{\text{ПСВ2}}) = f(115) = 0{,}17(\text{МПа})$$

4.2 Давление греющего пара ПСВ1:

$$\mathrm{P}^{s}_{\text{ПСВ1}} = f(t^{s}_{\text{ПСВ1}}) = f(95) = 0{,}085(\text{МПа})$$

5. Расход греющего пара через ПСВ2:

$$G^{\text{гр}}_{\text{ПСВ2}} = \frac{G_{\text{св}} \cdot (h^{\text{вых}}_{\text{ПСВ2}} - h^{\text{вх}}_{\text{ПСВ2}})}{(h^{\text{гр}}_{\text{ПСВ2}} - h^{\text{др}}_{\text{ПСВ2}})} = \frac{1730 \cdot (462 - 377{,}7)}{(2698{,}6 - 461{,}4)} = 65{,}2\left(\frac{\text{кг}}{\text{с}}\right)$$

Где:

$$h^{\text{вых}}_{\text{ПСВ2}} = f(\mathrm{P}_{\text{св}}; t^{\text{вых}}_{\text{ПСВ2}}) = f(1; 110) = 462\left(\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}\right)$$

$$h^{\text{вх}}_{\text{ПСВ2}} = f(\mathrm{P}_{\text{св}}; t^{\text{вх}}_{\text{ПСВ2}}) = f(1; 90) = 377{,}7\left(\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}\right)$$

$$h^{\text{гр}}_{\text{ПСВ2}} = f(\mathrm{P}^{s}_{\text{ПСВ2}}; t^{s}_{\text{ПСВ2}}) = f(0{,}17; 115) = 2698{,}6\left(\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}\right)$$

$$h^{\text{др}}_{\text{ПСВ2}} = f(\mathrm{P}^{s}_{\text{ПСВ2}}; t^{s}_{\text{ПСВ2}} - 5) = f(0{,}17; 110) = 461{,}4\left(\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}\right)$$

6. Расход греющего пара через ПСВ1:

$$G^{\text{гр}}_{\text{ПСВ1}} = \frac{G_{\text{св}} \cdot (h^{\text{вых}}_{\text{ПСВ1}} - h^{\text{вх}}_{\text{ПСВ1}}) - G^{\text{гр}}_{\text{ПСВ2}} \cdot (h^{\text{др}}_{\text{ПСВ2}} - h^{\text{др}}_{\text{ПСВ1}})}{(h^{\text{гр}}_{\text{ПСВ1}} - h^{\text{др}}_{\text{ПСВ1}})}$$

$$= \frac{1730 \cdot (377{,}7 - 293{,}8) - 65{,}2 \cdot (461{,}4 - 377)}{(2667{,}6 - 377)} = 60{,}9\left(\frac{\text{кг}}{\text{с}}\right)$$

Где:

$$h^{\text{вых}}_{\text{ПСВ1}} = h^{\text{вх}}_{\text{ПСВ2}} = 377{,}7\left(\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}\right)$$

$$h^{\text{вх}}_{\text{ПСВ1}} = f(\mathrm{P}_{\text{св}}; t^{\text{вх}}_{\text{ПСВ1}}) = f(1; 70) = 293{,}8\left(\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}\right)$$

$$h^{\text{гр}}_{\text{ПСВ1}} = f(\mathrm{P}^{s}_{\text{ПСВ1}}; t^{s}_{\text{ПСВ1}}) = f(0{,}085; 95) = 2667{,}6\left(\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}\right)$$

$$h^{\text{др}}_{\text{ПСВ1}} = f(\mathrm{P}^{s}_{\text{ПСВ1}}; t^{s}_{\text{ПСВ1}} - 5) = f(0{,}085; 90) = 377\left(\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}\right)$$

7. Определение отбор, с котором ПСВ соединение:

Приращение давление между отбором и ПСВ ΔP = 0,2 – 0,5 МПа.

$$P^{3}_{ПНД} = 0{,}32\ МПа\ \approx P^{s}_{ПСВ1} + 0{,}235 = 0{,}32\ МПа$$

Так как ПСВ1 соединение с ПНД3.

$$P^{4}_{ПНД} = 0{,}68\ МПа\ \approx P^{s}_{ПСВ2} + 0{,}51 = 0{,}68\ МПа$$

Так как ПСВ2 соединение с ПНД4.

8. Давление греющего пара: (новое давление)

8.1 Давление греющего пара ПСВ2:

$$P^{s}_{ПСВ2} = P^{4}_{ПНД} - 0{,}03 = 0{,}68 - 0{,}03 = 0{,}65(МПа)$$

8.2 Давление греющего пара ПСВ1:

$$P^{s}_{ПСВ1} = P^{3}_{ПНД} - 0{,}03 = 0{,}32 - 0{,}03 = 0{,}29(МПа)$$

9. Температура греющего пара на входе ПСВ:

9.1 Температура греющего пара на входе ПСВ2.

$$t^{s}_{ПСВ2} = f(P^{s}_{ПСВ2}) = f(0{,}65) = 162{,}2\ ℃$$

9.2 Температура греющего пара н входе ПСВ1.

$$t^{s}_{ПСВ1} = f(P^{s}_{ПСВ1}) = f(0{,}29) = 132{,}7\ ℃$$

10.Приращение температуры через ПСВ:

10.1 Приращение температуры через ПСВ2

$$t^{s}_{ПСВ2} = t^{вых}_{ПСВ2} + \delta t_{ПСВ2} => \delta t_{ПСВ2} = t^{s}_{ПСВ2} - t^{вых}_{ПСВ2} = 162{,}2 - 110 = 52{,}2\ ℃$$

10.2 Приращение температуры через ПСВ1

$$t^{s}_{ПСВ1} = t^{вых}_{ПСВ1} + \delta t_{ПСВ1} => \delta t_{ПСВ1} = t^{s}_{ПСВ1} - t^{вых}_{ПСВ1} = 132{,}7 - 90 = 42{,}7\ ℃$$

11.Расход греющего пара через ПСВ2:

$$G^{гр}_{ПСВ2} = \frac{G_{св} \cdot (h^{вых}_{ПСВ2} - h^{вх}_{ПСВ2})}{(h^{гр}_{ПСВ2} - h^{др}_{ПСВ2})} = \frac{1730 \cdot (462 - 377{,}7)}{(2460{,}9 - 663{,}5)} = 81{,}1\left(\frac{кг}{с}\right)$$

Где:

$$h^{вых}_{ПСВ2} = f(P_{св}; t^{вых}_{ПСВ2}) = f(1; 110) = 462\left(\frac{кДж}{кг}\right)$$

$$h^{вх}_{ПСВ2} = f(P_{св}; t^{вх}_{ПСВ2}) = f(1; 90) = 377{,}7\left(\frac{кДж}{кг}\right)$$

$$h^{гр}_{ПСВ2} = h_4 = 2460{,}9\left(\frac{кДж}{кг}\right)$$

$$h^{др}_{ПСВ2} = f(P^{s}_{ПСВ2}; t^{s}_{ПСВ2} - 5) = f(0{,}65; 157{,}2) = 663{,}5\left(\frac{кДж}{кг}\right)$$

12.Расход греющего пара через ПСВ1:

$$G_{\text{ПСВ1}}^{\text{гр}} = \frac{G_{\text{св}} \cdot (h_{\text{ПСВ1}}^{\text{вых}} - h_{\text{ПСВ1}}^{\text{вх}}) - G_{\text{ПСВ2}}^{\text{гр}} \cdot \left(h_{\text{ПСВ2}}^{\text{др}} - h_{\text{ПСВ1}}^{\text{др}}\right)}{\left(h_{\text{ПСВ1}}^{\text{гр}} - h_{\text{ПСВ1}}^{\text{др}}\right)}$$

$$= \frac{1730 \cdot (377{,}7 - 293{,}8) - 65{,}2 \cdot (663{,}5 - 536{,}6)}{(2860{,}2 - 536{,}6)} = 58 \left(\frac{\text{кг}}{\text{с}}\right)$$

Где:

$$h_{\text{ПСВ1}}^{\text{вых}} = h_{\text{ПСВ2}}^{\text{вх}} = 377{,}7 \left(\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}\right)$$

$$h_{\text{ПСВ1}}^{\text{вх}} = f(\text{P}_{\text{св}}; t_{\text{ПСВ1}}^{\text{вх}}) = f(1; 70) = 293{,}8 \left(\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}\right)$$

$$h_{\text{ПСВ1}}^{\text{гр}} = h_5 = 2860{,}2 \left(\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}\right)$$

$$h_{\text{ПСВ1}}^{\text{др}} = f(\text{P}_{\text{ПСВ1}}^{s}; t_{\text{ПСВ1}}^{s} - 5) = f(0{,}29; 127{,}7) = 536{,}6 \left(\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}\right)$$

Все результаты представлены в таблице 2.5

Таблица 2.5

Все результаты приведены

№ ПСВ	Давление греющего пара, МПа	Температура греющего пара, ^{0}C	Расход через ПСВ, кг/с
1 (ПСВ1)	0,29	132,7	81,8
2 (ПСВ2)	0,65	162,2	57,9

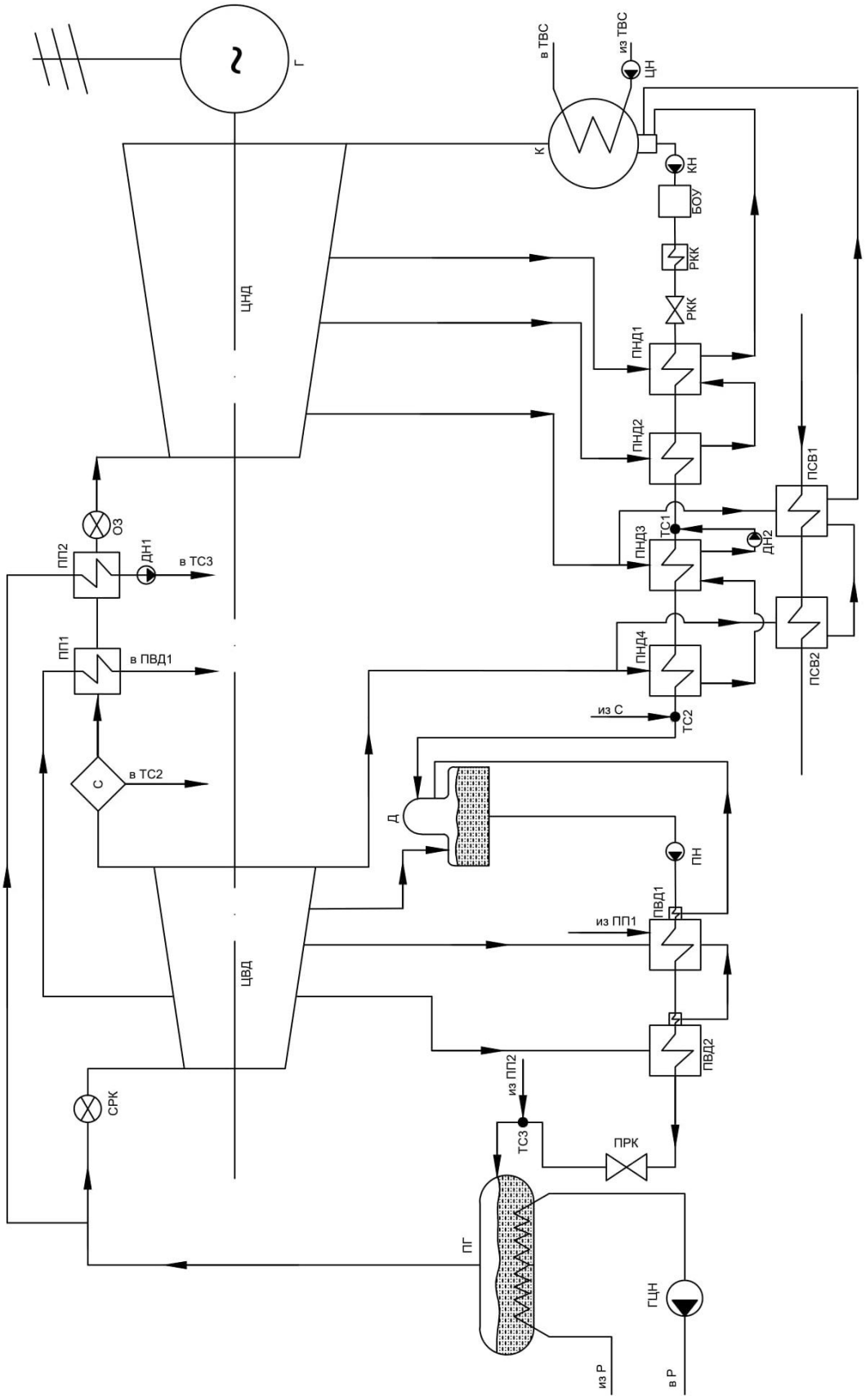

Рис.2.5. Принципиальная тепловая схема энергоблока ($\eta_{эл}$ = 33%).

2.6. Определение расходов среды

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

1. Расход перегревателя пара 2 и выхода из деаэратора (ТС2)

Уравнение тепла баланса в ТС3:

$$G_{\text{Д}}^{\text{вых}} \cdot h_{\text{ПВД2}}^{\text{вых}} + G_{\text{ПП2}} \cdot h_{\text{ПП2}}^{\text{др}} = G_{\text{ПВ}} \cdot h_{\text{ПВ}}$$

$$\text{P}_{\text{ПВД2}}^{\text{вых}} = \text{P}_{\text{ПН}}^{\text{вых}} - 2 \cdot \Delta\text{P}_{\text{ПВД}} = 9 - 2 \cdot 0{,}4 = 8{,}2 \text{ (МПа)}$$

$$h_{\text{ПВД2}}^{\text{вых}} = f\left(\text{P}_{\text{ПВД2}}^{\text{вых}}; t_{\text{ПВД2}}^{\text{вых}}\right) = f(8{,}2; 220{,}5) = 947{,}6 \left(\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}\right)$$

$$\text{P}_{\text{ПП2}}^{s} = \text{P}_{\text{ПГ}}^{\text{вых}} - \Delta\text{P}_{\text{ППР}} = 6{,}18 - 0{,}2 = 5{,}98 \text{ (МПа)}$$

$$h_{\text{ПП2}}^{\text{др}} = f(\text{P}_{\text{ПП2}}^{s}) = f(5{,}98) = 1212{,}3 \left(\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}\right)$$

$$h_{\text{ПВ}} = f(\text{P}_{\text{ПГ}}^{\text{вх}}; t_{\text{ПВ}}) = f(7; 223) = 958{,}7 \left(\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}\right)$$

Получим:

$$G_{\text{Д}}^{\text{вых}} \cdot 936{,}2 + G_{\text{ПП2}} \cdot 1212{,}3 = 1821 \cdot 958{,}7 \text{ (1)}$$

Уравнение сохранения расхода

$$G_{\text{Д}}^{\text{вых}} + G_{\text{ПП2}} = G_{\text{ПВ}} = 1821 \text{ (2)}$$

Из уравнения (1) и (2) получим:

$$G_{\text{Д}}^{\text{вых}} = 1744{,}6 \left(\frac{\text{кг}}{\text{с}}\right)$$

$$G_{\text{ПП2}} = 76{,}4 \left(\frac{\text{кг}}{\text{с}}\right)$$

2. Расход пара по ходу 1 (ПВД2):

Уравнение тепла баланса.

$$G_{\text{Д}}^{\text{вых}} \cdot h_{\text{ПВД2}}^{\text{вх}} + G_{\text{ПВД1}}^{\text{гр}} \cdot h_{\text{ПВД2}}^{\text{гр}} = G_{\text{Д}}^{\text{вых}} \cdot h_{\text{ПВД2}}^{\text{вых}} + G_{\text{ПВД1}}^{\text{гр}} \cdot h_{\text{ПВД2}}^{\text{др}}$$

$$\text{P}_{\text{ПВД1}}^{\text{вых}} = \text{P}_{\text{ПН}}^{\text{вых}} - \Delta\text{P}_{\text{ПВД}} = 9 - 0{,}4 = 8{,}6 \text{ (МПа)}$$

$$h_{\text{ПВД1}}^{\text{вых}} = h_{\text{ПВД2}}^{\text{вх}} = f\left(\text{P}_{\text{ПВД1}}^{\text{вых}}; t_{\text{ПВД1}}^{\text{вых}}\right) = f(8{,}6; 201{,}5) = 862 \left(\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}\right)$$

$$h^{\text{гр}}_{\text{ПВД2}} = h_1 = 2643{,}2\left(\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}\right)$$

$$t^{s}_{\text{ПВД2}} = t^{\text{вых}}_{\text{ПВД2}} + \Delta t_{\text{ПВД}} = 220{,}5 + 3 = 223{,}5℃$$

$$\text{P}^{s}_{\text{ПВД2}} = f\left(t^{s}_{\text{ПВД2}}\right) = f(223{,}5) = 2{,}48\ (\text{МПа})$$

$$h^{\text{др}}_{\text{ПВД2}} = f\left(\text{P}^{s}_{\text{ПВД2}}; t^{s}_{\text{ПВД2}} - 5\right) = f(2{,}48; 218{,}5) = 936{,}8\left(\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}\right)$$

$$G^{\text{гр}}_{\text{ПВД1}} = \frac{G^{\text{вых}}_{\text{Д}} \cdot \left(h^{\text{вых}}_{\text{ПВД2}} - h^{\text{вх}}_{\text{ПВД2}}\right)}{h^{\text{гр}}_{\text{ПВД2}} - h^{\text{др}}_{\text{ПВД2}}} = \frac{1744{,}6 \cdot (947{,}6 - 862)}{2643{,}2 - 936{,}8} = 87{,}5\ \left(\frac{\text{кг}}{\text{с}}\right)$$

3. Расход пара по ходу 2 (ПВД1):

Уравнение тепла баланса.

$$G^{\text{вых}}_{\text{Д}} \cdot h^{\text{вх}}_{\text{ПВД1}} + G_2 \cdot h^{\text{гр}}_{\text{ПВД1}} + G_{\text{ПП1}} \cdot h^{\text{др}}_{\text{ПП1}} + G_1 \cdot h^{\text{др}}_{\text{ПВД2}} = G^{\text{вых}}_{\text{Д}} \cdot h^{\text{вых}}_{\text{ПВД1}} + G_2 \cdot h^{\text{др}}_{\text{ПВД1}} + G_1 \cdot h^{\text{др}}_{\text{ПВД1}} + G_{\text{ПП1}} \cdot h^{\text{др}}_{\text{ПВД1}}$$

$$h^{\text{вх}}_{\text{ПВД1}} = f\left(\text{P}^{\text{вых}}_{\text{ПН}}; t^{\text{вх}}_{\text{ПВД1}}\right) = f(9; 182{,}5) = 778{,}2\left(\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}\right)$$

$$h^{\text{гр}}_{\text{ПВД1}} = h_2 = 2587{,}7\left(\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}\right)$$

$$t^{s}_{\text{ПВД1}} = t^{\text{вых}}_{\text{ПВД1}} + \Delta t_{\text{ПВД}} = 201{,}5 + 3 = 204{,}5℃$$

$$\text{P}^{s}_{\text{ПВД1}} = f\left(t^{s}_{\text{ПВД1}}\right) = f(204{,}5) = 1{,}71\ (\text{МПа})$$

$$h^{\text{др}}_{\text{ПВД1}} = f\left(\text{P}^{s}_{\text{ПВД1}}; t^{s}_{\text{ПВД1}} - 5\right) = f(1{,}71; 199{,}5) = 850{,}2\left(\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}\right)$$

$$h^{\text{др}}_{\text{ПП1}} = f(\text{P}_1 - 0{,}2) = f(2{,}48 - 0{,}2) = 947{,}4\left(\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}\right)$$

Принять расход через ПП1 равно 70 (кг/с).

$$G_2 = \frac{G^{\text{вых}}_{\text{Д}} \cdot \left(h^{\text{вых}}_{\text{ПВД1}} - h^{\text{вх}}_{\text{ПВД1}}\right) - G_1 \cdot \left(h^{\text{др}}_{\text{ПВД2}} - h^{\text{др}}_{\text{ПВД1}}\right) - G_{\text{ПП1}} \cdot \left(h^{\text{др}}_{\text{ПП1}} - h^{\text{др}}_{\text{ПВД1}}\right)}{h^{\text{гр}}_{\text{ПВД1}} - h^{\text{др}}_{\text{ПВД1}}}$$

$$= \frac{1744{,}6 \cdot (862 - 778{,}2) - 87{,}5 \cdot (936{,}8 - 850{,}2) - 70 \cdot (947{,}4 - 850{,}2)}{2587{,}7 - 850{,}2}$$

$$= 75{,}9\ \left(\frac{\text{кг}}{\text{с}}\right)$$

4. Расход пара по ходу 3 (Д):

Уравнение тепла баланса.

$$G_{\text{ПВД1+2+ПП1}} \cdot h_{\text{ПВД1}}^{\text{др}} + G_{\text{З}} \cdot h_{\text{Д}}^{\text{гр}} + G_{\text{ТС1}}^{\text{вых}} \cdot h_{\text{Д}}^{\text{вх}} = G_{\text{Д}}^{\text{вых}} \cdot h_{\text{Д}}^{\text{вых}}$$

$$h_{\text{Д}}^{\text{вх}} = f\left(\text{Р}_{\text{Д}}^{\text{вх}}; t_{\text{Д}}^{\text{вх}}\right) = f(1; 165) = 697{,}5 \left(\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}\right)$$

$$h_{\text{д}}^{\text{гр}} = h_{\text{з}} = 2511{,}6 \left(\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}\right)$$

$$G_{\text{ПВД1+2+ПП1}} = G_1 + G_2 + G_{\text{ПП1}} = 87{,}5 + 75{,}9 + 70 = 233{,}4 \left(\frac{\text{кг}}{\text{с}}\right)$$

$$h_{\text{Д}}^{\text{вых}} = f\left(\text{Р}_{\text{Д}}^{s}\right) = f(1) = 762{,}7 \left(\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}\right)$$

$$233{,}4 \cdot 843{,}5 + G_{\text{З}} \cdot 2511{,}6 + G_{\text{ТС1}}^{\text{вых}} \cdot 697{,}5 = 1744{,}6 \cdot 762{,}7 \ (3)$$

Уравнение сохранение расхода в деаэраторе:

$$G_{\text{Д}}^{\text{вых}} = G_{\text{З}} + G_{\text{ПВД1+2+ПП1}} + G_{\text{ТС1}}^{\text{вых}} = 1744{,}6 \ (4)$$

Из уравнения (3) и (4) получим:

$$G_{\text{ТС1}}^{\text{вых}} = 1468{,}1 \left(\frac{\text{кг}}{\text{с}}\right)$$

$$G_{\text{З}} = 43{,}1 \left(\frac{\text{кг}}{\text{с}}\right)$$

5. Расход по ходу 4 (ПНД4) и выхода из сепаратора (СЕП) (ТС2 и ПНД4)

Уравнение тепла баланса в ПНД4:

$$G_{\text{ПНДЗ}}^{\text{вх}} \cdot h_{\text{ПНД4}}^{\text{вх}} + G_{\text{ПНД4}}^{\text{гр}} \cdot h_{\text{ПНД4}}^{\text{гр}} = G_{\text{ПНД4}}^{\text{гр}} \cdot h_{\text{ПНД4}}^{\text{др}} + G_{\text{ПНДЗ}}^{\text{вх}} \cdot h_{\text{ПНД4}}^{\text{вых}}$$

$$\text{Р}_{\text{ПНД4}}^{\text{вых}} = \text{Р}_{\text{КН}}^{\text{вых}} - 4 \cdot \Delta\text{Р}_{\text{ПНД}} - \Delta\text{Р}_{\text{ОЭ}} - \Delta\text{Р}_{\text{РКК}} - \Delta\text{Р}_{\text{БОУ}}$$

$$= 2{,}5 - 4 \cdot 0{,}15 - 0{,}07 - 0, -0{,}3 = 1{,}23 \ (\text{МПа})$$

$$h_{\text{ПНД4}}^{\text{вых}} = f\left(\text{Р}_{\text{ПНД4}}^{\text{вых}}; t_{\text{ПНД4}}^{\text{вых}}\right) = f(1{,}23; 161) = 680{,}3 \left(\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}\right)$$

$$\text{Р}_{\text{ПНДЗ}}^{\text{вых}} = \text{Р}_{\text{ПНД4}}^{\text{вх}} = \text{Р}_{\text{ПНД4}}^{\text{вых}} + \Delta\text{Р}_{\text{ПНД}} = 1{,}23 + 0{,}15 = 1{,}38 \ (\text{МПа})$$

$$h_{\text{ПНДЗ}}^{\text{вых}} = h_{\text{ПНД4}}^{\text{вх}} = f\left(\text{Р}_{\text{ПНДЗ}}^{\text{вых}}; t_{\text{ПНДЗ}}^{\text{вых}}\right) = f(1{,}38; 131) = 551{,}4 \left(\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}\right)$$

$$h_{\text{ПП2}}^{\text{гр}} = h_4 = 2460{,}9 \left(\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}\right)$$

$$t^{s}_{\text{ПНД4}} = t^{\text{вых}}_{\text{ПНД4}} + \Delta t_{\text{ПВД}} = 161 + 3 = 164\ ℃$$

$$\text{P}^{s}_{\text{ПНД4}} = f\left(t^{s}_{\text{ПНД4}}\right) = f(164) = 0{,}68\ (\text{МПа})$$

$$h^{\text{др}}_{\text{ПНД4}} = f\left(\text{P}^{s}_{\text{ПНД4}}; t^{s}_{\text{ПНД4}} - 5\right) = f(0{,}68; 164) = 671{,}3\left(\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}\right)$$

Получим:

$$G^{\text{вх}}_{\text{ПНД3}} \cdot 551{,}4 + G^{\text{гр}}_{\text{ПНД4}} \cdot 2460{,}9 = G^{\text{гр}}_{\text{ПНД4}} \cdot 671{,}3 + G^{\text{вх}}_{\text{ПНД3}} \cdot 680{,}3\ (5)$$

Уравнение сохранения расхода в ТС1

$$\text{а} = G_{\text{ПВ}} - G^{\text{гр}}_{\text{ПВД1}} - G_{\text{ПП1}} - G_{2} - G_{3} - G_{\text{ПСВ2}} - G_{\text{ПП2}} = 1387$$

$$G^{\text{вх}}_{\text{ПНД3}} + \frac{y^{\text{вых}}_{\text{ЦВД}}}{100}\left(\text{а} - G^{\text{гр}}_{\text{ПНД4}}\right) = G^{\text{вых}}_{\text{ТС1}} = 1468{,}1\ (6)$$

Из уравнения (5) и (6) получим:

$$G^{\text{вх}}_{\text{ПНД3}} = 1277{,}7\ \left(\frac{\text{кг}}{\text{с}}\right)$$

$$G^{\text{гр}}_{\text{ПНД4}} = 92\ \left(\frac{\text{кг}}{\text{с}}\right)$$

Уравнение тепла баланса в ТС1:

$$G^{\text{вх}}_{\text{ПНД3}} \cdot h^{\text{вых}}_{\text{ПНД4}} + G_{\text{СЕП}} \cdot h^{\text{др}}_{\text{СЕП}} = G^{\text{вых}}_{\text{ТС1}} \cdot h^{\text{вх}}_{\text{Д}}$$

$$G_{\text{СЕП}} = \frac{y^{\text{вых}}_{\text{ЦВД}}}{100} G^{\text{вых}}_{\text{ЦВД}} = \frac{y^{\text{вых}}_{\text{ЦВД}}}{100}\left(\text{а} - G^{\text{гр}}_{\text{ПНД4}}\right) = \frac{14{,}7}{100}(1387 - 92) = \frac{14{,}7}{100}1295$$

$$= 190{,}4\left(\frac{\text{кг}}{\text{с}}\right)$$

$$h^{\text{др}}_{\text{СЕП}} = \frac{G^{\text{вых}}_{\text{ТС1}} \cdot h^{\text{вх}}_{\text{Д}} - G^{\text{вх}}_{\text{ПНД3}} \cdot h^{\text{вых}}_{\text{ПНД4}}}{G_{\text{СЕП}}} = \frac{1468{,}1 \cdot 697{,}5 - 1277{,}7 \cdot 680{,}3}{190{,}4}$$

$$= 813{,}1\left(\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}\right)$$

Проверить расход через перегреватель пара 1:

$$G^{\text{вых}}_{\text{ЦВД}} = 1295\ \left(\frac{\text{кг}}{\text{с}}\right)$$

Тепло баланса в сепараторе:

$$G^{\text{вых}}_{\text{ЦВД}} \cdot h_{4} = G_{\text{СЕП}} \cdot h^{\text{др}}_{\text{СЕП}} + G^{\text{вх}}_{\text{ЦНД}} \cdot h^{\text{вых}}_{\text{СЕП}}$$

$$G^{\text{вх}}_{\text{ЦНД}} = G^{\text{вых}}_{\text{ЦВД}} - G_{\text{СЕП}} = 1295 - 190{,}4 = 1104{,}6\ \left(\frac{\text{кг}}{\text{с}}\right)$$

$$h_{\text{СЕП}}^{\text{вых}} = h_{\text{ПП1}}^{\text{вх}} = \frac{G_{\text{ЦВД}}^{\text{вых}} \cdot h_4 - G_{\text{СЕП}} \cdot h_{\text{СЕП}}^{\text{др}}}{G_{\text{ЦНД}}^{\text{вх}}} = \frac{1295 \cdot 2460{,}9 - 190{,}4 \cdot 813{,}1}{1104{,}6}$$

$$= 2744{,}9 \left(\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}\right)$$

Тепло баланса в перегреватель пара 2:

$$G_{\text{ЦНД}}^{\text{вх}} \cdot h_{\text{ПП2}}^{\text{вх}} + G_{\text{ПП2}} \cdot h_0 = G_{\text{ЦНД}}^{\text{вх}} \cdot h_{\text{ПП2}}^{\text{вых}} + G_{\text{ПП2}} \cdot h_{\text{ПП2}}^{\text{др}}$$

$$h_{\text{ПП1}}^{\text{вых}} = h_{\text{ПП2}}^{\text{вх}} = \frac{G_{\text{ЦНД}}^{\text{вх}} \cdot h_{\text{ПП2}}^{\text{вых}} - G_{\text{ПП2}} \cdot \left(h_0 - h_{\text{ПП2}}^{\text{др}}\right)}{G_{\text{ЦНД}}^{\text{вх}}}$$

$$= \frac{1104{,}6 \cdot 2978{,}1 - 76{,}4 \cdot (2778{,}83 - 1212{,}3)}{1104{,}6}$$

$$= 2869{,}8 \left(\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}\right)$$

Тепло баланса в перегреватель пара 1:

$$G_{\text{ЦНД}}^{\text{вх}} \cdot h_{\text{ПП1}}^{\text{вх}} + G_{\text{ПП1}}^{(1)} \cdot h_1 = G_{\text{ЦНД}}^{\text{вх}} \cdot h_{\text{ПП1}}^{\text{вых}} + G_{\text{ПП1}}^{(1)} \cdot h_{\text{ПП1}}^{\text{др}}$$

$$G_{\text{ПП1}}^{(1)} = \frac{G_{\text{ЦНД}}^{\text{вх}} \cdot (h_{\text{ПП1}}^{\text{вых}} - h_{\text{ПП1}}^{\text{вх}})}{h_1 - h_{\text{ПП1}}^{\text{др}}} = \frac{1104{,}6 \cdot (2869{,}8 - 2744{,}9)}{2643{,}2 - 947{,}4} = 81{,}4 \left(\frac{\text{кг}}{\text{с}}\right)$$

$$\Delta G_{\text{ПП1}} = \left|\frac{G_{\text{ПП1}} - G_{\text{ПП1}}^{(1)}}{G_{\text{ПП1}}}\right| \cdot 100\% = \left|\frac{81{,}4 - 70}{81{,}4}\right| \cdot 100\% = 16{,}23\% > 1\%$$

Так как я принимаю новый расход через ПП1 и снова рассчитываем. Через три раза получаем:

Таблица 2.6

Полученные значения расчета

Параметр	Значение	Единица измерения
$G_{ПП1}^{(3)}$	80,4	кг/с
G_2	75,3	
G_3	42,2	
$G_{ТС1}^{вых}$	1459,2	
$G_{ПНД3}^{вх}$	1270,1	
$G_{ПНД4}^{гр}$	91,5	
$G_{ЦВД}^{вых}$	1286,6	
$G_{СЕП}$	189,1	
$G_{ЦНД}^{вх}$	1097,5	
$G_{ПП1}^{(4)}$	80,4	
Δ	0	%

Последние три итерации по расходу совпали с достаточной точностью (менее 1%). Расчет можно считать завершенным.

6. Расход пара по ходу 5 (ПНД3):

Принимаем через ТС1 температура на входе ПНД3 увеличивается 3,5 ^{0}С равна 104,5 ^{0}С.

Уравнение тепло баланса.

$$G_{ПНД3}^{вых} \cdot h_{ПНД3}^{вх} + G_{ПНД3}^{гр} \cdot h_{ПНД3}^{гр} + G_4 \cdot h_{ПНД4}^{др} = G_{ПНД3}^{вых} \cdot h_{ПНД3}^{вых} + G_{ПНД4}^{гр} \cdot h_{ПНД3}^{др} + G_{ПНД3}^{гр} \cdot h_{ПНД3}^{др}$$

$$Р_{ПНД2}^{вых} = Р_{ПНД4}^{вых} + 2 \cdot \Delta Р_{ПНД} = 1{,}23 + 2 \cdot 0{,}15 = 1{,}53 \text{ (МПа)}$$

$$h_{ПНД3}^{вх} = f\left(Р_{ПНД2}^{вых}; t_{ПНД2}^{вых}\right) = f(1{,}53; 104{,}5) = 439{,}1 \left(\frac{кДж}{кг}\right)$$

$$h_{ПНД3}^{гр} = h_5 = 2860{,}2 \left(\frac{кДж}{кг}\right)$$

$$t_{ПНД3}^{s} = t_{ПВД3}^{вых} + \Delta t_{ПНД} = 131 + 5 = 136 \text{ ℃}$$

$$\mathrm{P}^{s}_{\text{ПНД3}} = f\left(t^{s}_{\text{ПНД3}}\right) = f(136) = 0{,}32 \text{ (МПа)}$$

$$h^{\text{др}}_{\text{ПНД3}} = f\left(\mathrm{P}^{s}_{\text{ПНД3}}; t^{s}_{\text{ПНД3}} - 5\right) = f(0{,}32; 131) = 550{,}7 \left(\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}\right)$$

Получим:

$$G^{\text{гр}}_{\text{ПНД3}} = \frac{G^{\text{вых}}_{\text{ПНД3}} \cdot \left(h^{\text{вых}}_{\text{ПНД3}} - h^{\text{вх}}_{\text{ПНД3}}\right) - G^{\text{гр}}_{\text{ПНД4}} \cdot \left(h^{\text{др}}_{\text{ПНД4}} - h^{\text{др}}_{\text{ПНД3}}\right)}{h^{\text{гр}}_{\text{ПНД3}} - h^{\text{др}}_{\text{ПНД3}}}$$

$$= \frac{1277{,}7 \cdot (551{,}4 - 439{,}1) - 91{,}5 \cdot (671{,}3 - 550{,}7)}{2860{,}2 - 550{,}7} = 57 \left(\frac{\text{кг}}{\text{с}}\right)$$

7. Расход пара по ходу 6 (ПНД2): (ПНД2 + ТС1)

Уравнение сохранения расхода:

$$G^{\text{вых}}_{\text{К}} = G^{\text{вых}}_{\text{ПНД3}} - G^{4+3}_{\text{ПНД}} = 1277{,}7 - 57 - 91{,}5 = 1121{,}6 \left(\frac{\text{кг}}{\text{с}}\right)$$

Проверить условие принимать температуру через ТС1

$$G^{4+5}_{\text{ПНД}} = G^{\text{гр}}_{\text{ПНД4}} + G^{\text{гр}}_{\text{ПНД3}} = 91{,}5 + 57 = 148{,}5 \left(\frac{\text{кг}}{\text{с}}\right)$$

$$G^{\text{вых}}_{\text{К}} \cdot h^{\text{вых}}_{\text{ПНД2}} + G^{4+5}_{\text{ПНД}} \cdot h^{\text{др}}_{\text{ПНД3}} = 1121{,}6 \cdot 424{,}4 + 148{,}5 \cdot 550{,}7$$

$$= 557786 \left(\frac{\text{кДж}}{\text{с}}\right)$$

$$G^{\text{вых}}_{\text{ПНД3}} \cdot h^{\text{вх}}_{\text{ПНД3}} = 1277{,}7 \cdot 439{,}1 = 561000 \left(\frac{\text{кДж}}{\text{с}}\right)$$

Получаем

$$G^{\text{вых}}_{\text{К}} \cdot h^{\text{вых}}_{\text{ПНД2}} + G^{4+5}_{\text{ПНД}} \cdot h^{\text{др}}_{\text{ПНД3}} \cong G^{\text{вых}}_{\text{ПНД3}} \cdot h^{\text{вх}}_{\text{ПНД3}}$$

Поэтому можно принять увеличение температуры 3,5 ^{0}С.

Уравнение тепло баланса.

$$G^{\text{вых}}_{\text{К}} \cdot h^{\text{вх}}_{\text{ПНД2}} + G_6 \cdot h^{\text{гр}}_{\text{ПНД2}} = G^{\text{вых}}_{\text{К}} \cdot h^{\text{вых}}_{\text{ПНД2}} + G_6 \cdot h^{\text{др}}_{\text{ПНД3}}$$

$$\mathrm{P}^{\text{вых}}_{\text{ПНД1}} = \mathrm{P}^{\text{вых}}_{\text{ПНД4}} + 3 \cdot \Delta \mathrm{P}_{\text{ПНД}} = 1{,}23 + 3 \cdot 0{,}15 = 1{,}68 \text{ (МПа)}$$

$$h^{\text{вх}}_{\text{ПНД2}} = f\left(\mathrm{P}^{\text{вых}}_{\text{ПНД1}}; t^{\text{вых}}_{\text{ПНД1}}\right) = f(1{,}68; 71) = 298{,}6 \left(\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}\right)$$

$$h^{\text{гр}}_{\text{ПНД2}} = h_6 = 2716{,}8 \left(\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}\right)$$

$$t^{s}_{\text{ПНД2}} = t^{\text{вых}}_{\text{ПВД2}} + \Delta t_{\text{ПНД}} = 101 + 5 = 106 \text{ °C}$$

$$\mathrm{P}^{s}_{\text{ПНД2}} = f\left(t^{s}_{\text{ПНД2}}\right) = f(106) = 0{,}13 \text{ (МПа)}$$

$$h^{\text{др}}_{\text{ПНД2}} = f\left(\mathrm{P}^{s}_{\text{ПНД2}}; t^{s}_{\text{ПНД2}} - 5\right) = f(0{,}13; 101) = 423{,}3\left(\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}\right)$$

Получим:

$$G_6 = \frac{G_{\text{к}}^{\text{вых}} \cdot \left(h^{\text{вых}}_{\text{ПНД2}} - h^{\text{вх}}_{\text{ПНД2}}\right)}{h^{\text{гр}}_{\text{ПНД2}} - h^{\text{др}}_{\text{ПНД2}}} = \frac{1121{,}6 \cdot (424{,}4 - 298{,}6)}{2716{,}8 - 423{,}3} = 61{,}5\ \left(\frac{\text{кг}}{\text{с}}\right)$$

8. Расход пара по ходу 7 (ПНД1):

Уравнение тепло баланса.

$$G_{\text{К}}^{\text{вых}} \cdot h^{\text{вх}}_{\text{ПНД1}} + G_7 \cdot h^{\text{гр}}_{\text{ПНД1}} + G_6 \cdot h^{\text{др}}_{\text{ПНД2}} = G_{\text{К}}^{\text{вых}} \cdot h^{\text{вых}}_{\text{ПНД1}} + G_7 \cdot h^{\text{др}}_{\text{ПНД2}} + G_6 \cdot h^{\text{др}}_{\text{ПНД1}}$$

$$h^{\text{вх}}_{\text{ПНД1}} = f\left(\mathrm{P}^{\text{вых}}_{\text{ОЭ}}; t^{\text{вых}}_{\text{ОЭ}}\right) = f(1{,}83; 41) = 173{,}3\left(\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}\right)$$

$$h^{\text{гр}}_{\text{ПНД1}} = h_7 = 2571{,}8\left(\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}\right)$$

$$t^{s}_{\text{ПНД1}} = t^{\text{вых}}_{\text{ПВД1}} + \Delta t_{\text{ПНД}} = 71 + 5 = 76\ ℃$$

$$\mathrm{P}^{s}_{\text{ПНД1}} = f\left(t^{s}_{\text{ПНД1}}\right) = f(76) = 0{,}04 \text{ (МПа)}$$

$$h^{\text{др}}_{\text{ПНД1}} = f\left(\mathrm{P}^{s}_{\text{ПНД1}}; t^{s}_{\text{ПНД1}} - 5\right) = f(0{,}04; 71) = 297{,}2\left(\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}\right)$$

Получим:

$$G_7 = \frac{G_{\text{к}}^{\text{вых}} \cdot \left(h^{\text{вых}}_{\text{ПНД1}} - h^{\text{вх}}_{\text{ПНД1}}\right) - G_6 \cdot \left(h^{\text{др}}_{\text{ПНД2}} - h^{\text{др}}_{\text{ПНД1}}\right)}{h^{\text{гр}}_{\text{ПНД2}} - h^{\text{др}}_{\text{ПНД2}}}$$

$$= \frac{1121{,}6 \cdot (298{,}6 - 173{,}3) - 61{,}5 \cdot (423{,}3 - 297{,}2)}{2571{,}8 - 297{,}2}$$

$$= 66{,}6\ \left(\frac{\text{кг}}{\text{с}}\right)$$

9. Расход по ходу 8 (конденсатор)

$$G_8 = G_{\text{ок}} = G_{\text{ЦНД}}^{\text{вх}} - G_{\text{ПНД3}}^{\text{гр}} - G_{\text{ПСВ1}} - G_6 - G_7$$

$$= 1097{,}5 - 57 - 58 - 61{,}5 - 66{,}6 = 854{,}4 \left(\frac{\text{кг}}{\text{с}}\right)$$

Все результаты представлены в таблице 2.7.

Таблица 2.7

Расходы среды на каждый подогревающий элемент

Параметр (элемент)	Значение (кг/с)
G_1 (ПВД2+ПП1)	167,9
G_2 (ПВД1)	75,3
G_3 (Д)	42,2
G_4 (ПНД4+ПСВ2)	172,6
G_5 (ПНД3+ПСВ1)	115
G_6 (ПНД2)	61,5
G_7 (ПНД1)	66,6
G_8 (К)	854,4
$G_{\text{ПП1}}$	80,4
$G_{\text{ПП2}}$	76,4
$G_{\text{СЕП}}$	189,1

2.7. Расчет внутренней мощности турбины.

Рассчитав отборы на подогреватели, определим внутренние мощности каждого отсека по формуле: [9]

$$N_i^{\text{отс}} = G_i^{\text{отс}} \cdot (h_{\text{отс}-i}^{\text{вх}} - h_{\text{отс}-i}^{\text{вых}}) \text{ (МВт)}$$

$$N_{\text{эл}}^{\text{расч}} = \sum_{i=1}^{n} N_i^{\text{отс}} \cdot \eta_{\text{мех}} \cdot \eta_{\text{т}} \text{(МВт)}$$

Пример:

$$N_1^{\text{отс}} = G_1^{\text{отс}} \cdot (h_0 - h_1) = 1744{,}6 \cdot (2778{,}83 - 2643{,}2) = 236{,}7 \text{ (МВт)}$$

$$N_2^{\text{отс}} = G_2^{\text{отс}} \cdot (h_1 - h_2) = 1576{,}7 \cdot (2643{,}2 - 2587{,}7) = 87{,}4 \text{ (МВт)}$$

$$N_3^{\text{отс}} = G_3^{\text{отс}} \cdot (h_2 - h_3) = 1501{,}4 \cdot (2587{,}7 - 2511{,}6) = 114{,}3 \text{ (МВт)}$$

Все результаты представлены в таблице 2.8.

Таблица 2.8

Внутренние мощности турбоустановки

№ отсеки	Энтальпия, кДж/кг		Расход, кг/с	Мощность, МВт
	Вход	Выход		
1	2778,83	2643,18	1744,6	236,7
2	2643,18	2587,74	1576,7	87,4
3	2587,74	2511,6	1501,4	114,3
4	2511,6	2460,91	1459,2	74
5	2978,1	2860,18	1097,5	129,4
6	2860,18	2716,76	982,5	140,9
7	2716,76	2571,78	921	133,5
8	2571,78	2363,42	854,4	178
сумма				1094,2

Расчетная мощность на клеммах генератора находится по следующей зависимости:

$$N_{\text{эл}}^{\text{расч}} = \sum_{i=1}^{n} N_i^{\text{отс}} \cdot \eta_{\text{мех}} \cdot \eta_{\text{г}} \text{(МВт)}$$

$\eta_{\text{мех}}$ – механический КПД, $\eta_{\text{мех}} = 0{,}99$.

$\eta_{\text{ген}}$ – КПД генератора, $\eta_{\text{ген}} = 0{,}99$.

$$N_{эл}^{расч} = 1094{,}2 \cdot 0{,}99 \cdot 0{,}99 = 1072{,}5(МВт)$$

2.8. Расход электроэнергии на собственные нужды

К учитываемым собственным нуждам энергоблока относятся потери электроэнергии на приводы насосов. Для всех насосов расходы электроэнергии вычисляются по формуле:

$$N = \frac{G \cdot \Delta p \cdot \bar{\vartheta}}{\eta_н \cdot \eta_{эл.пр}}$$

где:

G – расход среды через насос, кг/с.

Δp – напор, создаваемый насосом, МПа.

$\bar{\vartheta}$ – средний удельный объем среды в насосе, м3/кг.

$\eta_н$ – внутренний относительный КПД насоса.

$\eta_{эл.пр}$ – КПД привода насоса; $\eta_{эл.пр} = 0{,}85$.

Для ГЦН:

Принимаем $\Delta p = 0{,}7$ МПа, $\bar{\vartheta} = f(16{,}2\ МПа, 305℃) = 0{,}0014\ м^3/кг$.

Для ЦН:

$$h_8 = 2373{,}2\ \left(\frac{кДж}{кг}\right)$$

$$h_к^s = 146{,}7\ \left(\frac{кДж}{кг}\right)$$

$$h_{цн}^{вх} = f\left(Р_{цн}; t_{цн}^{вх}\right) = f(1; 20) = 84{,}9\left(\frac{кДж}{кг}\right)$$

$$h_{цн}^{вых} = f\left(Р_{цн}; t_{цн}^{вых}\right) = f(1; 30) = 126{,}7\left(\frac{кДж}{кг}\right)$$

Мощность циркуляционного насоса:

$$N_{цн} = \frac{G_{ок} \cdot m \cdot g \cdot H}{\eta_{цн} \cdot \eta_{эл.пр}}$$

где:

m – кратность охлаждения,

$$m = \frac{h_8 - h_к^s}{h_{цн}^{вых} - h_{цн}^{вх}} = \frac{2373{,}2 - 146{,}7}{126{,}7 - 84{,}9} = 53$$

H – создаваемый ЦН напор, $H = 20$ м.

Соответственно:

$$N_{цн} = \frac{857{,}8 \cdot 53 \cdot 9{,}81 \cdot 20}{0{,}86 \cdot 0{,}85} = 12{,}2 \text{ МВт}$$

Расходы электроэнергии на собственные нужды приведены в таблице 2.9.

Таблица 2.9

Расходы электроэнергии на собственные нужды приведены

Наименование насоса	G, кг/с	Δp, МПа	$\bar{\vartheta}$, м3/кг	$\eta_{эл.пр}$	$\eta_н$	N, МВт
КН	1121,6	2,5	0,001	0,85	0,77	4,3
ПН	1744,6	8	0,00113		0,81	22,8
ГЦН	19836,5	0,648	0,0014		0,85	25
ЦН	45315,9	-	-		0,86	12,2
ДН1	76,4	1,025	0,00131		0,8	0,15
ДН2	148,5	1,21	0,00107		0,8	0,28
сумма						64,7

Теплота, затраченная на производство электроэнергии:

$$Q_э = G_{пв} \cdot (h_0 - h_{пв}) \cdot 10^{-3} - Q_{тф}$$

$$= 1821 \cdot (2788{,}83 - 958{,}7) \cdot 10^{-3} - 291 = 3023{,}5 \text{ МВт};$$

Электрический КПД АЭС нетто:

$$\eta_{нетто} = \frac{N_{эл.расч} - N_{сн}}{Q_э} = \frac{1072{,}5 - 64{,}7}{3023{,}5} = 0{,}3333 = 33{,}33\ \%$$

Отклонение расчетной электрической мощности от заданной:

$$\Delta = \left|\frac{N_{эл.расч} - N_{сн} - N_{эл}}{N_{эл}}\right| \cdot 100\% = \left|\frac{1072{,}5 - 64{,}7 - 1000}{1000}\right| \cdot 100\%$$

$$= 0{,}78\ \%$$

Получаем $\Delta = 0{,}78\% > 0{,}5\%$.

Используем новый КПД, перечитаем и получаем расчетную мощность на клеммах генератора по КПД 33,33%.

$$N_{эл}^{расч}(33{,}35\%) = 1062{,}2(МВт)$$

Расходы электроэнергии на собственные нужды по КПД 33,33%:

$$N_{сн} = 64{,}1\ (МВт)$$

Теплота, затраченная на производство электроэнергии:

$$Q_э = G_{пв} \cdot (h_0 - h_{пв}) \cdot 10^{-3} - Q_{тф}$$

$$= 1804{,}6 \cdot (2788{,}83 - 958{,}7) \cdot 10^{-3} - 291 = 2993{,}6\ МВт;$$

Электрический КПД АЭС нетто:

$$\eta_{нетто} = \frac{N_{эл.расч} - N_{сн}}{Q_э} = \frac{1062{,}2 - 64{,}1}{2993{,}6} = 0{,}3335 = 33{,}35\ \%$$

Отклонение расчетной электрической мощности от заданной:

$$\Delta = \left|\frac{N_{эл.расч} - N_{сн} - N_{эл}}{N_{эл}}\right| \cdot 100\% = \left|\frac{1062{,}2 - 64{,}1 - 1000}{1000}\right| \cdot 100\%$$

$$= 0{,}15\%$$

$\Delta = 0{,}15\% < 0{,}5\%$

Полученные результаты представлены таблице 2.10.

Таблица 2.10

Полученные значения расчета

Параметр	Значение (КПД = 33%)	Значение (КПД = 33,33%)	величина
Q_1	3321	3292	МВт
$G_{\text{теп}}$	19836,5	19657,3	кг/с
$G_{\text{пв}}$	1821	1084,6	
G_1	167,9	166,3	
G_2	75,3	74,6	
G_3	42,2	41,9	
G_4	172,6	171,8	
G_5	115	114,5	
G_6	61,5	61	
G_7	66,6	66	
$G_{\text{пп1}}$	80,4	79,6	
$G_{\text{пп2}}$	76,4	75,7	
$G_{\text{цвд}}^{\text{вых}}$	1286,6	1274,3	
$G_{\text{сеп}}$	189,1	187,3	
$G_{\text{сеп}}^{\text{вых}}$	1097,5	1087	
$G_{\text{цнд}}^{\text{вых}}$	854,4	845,5	
$G_{\text{ок}}$	854,4	845,5	
$G_{\text{ПНД4}}^{\text{гр}}$	91,5	90,7	
$G_{\text{ПНД3}}^{\text{гр}}$	57	56,5	
$G_{\text{ПСВ2}}^{\text{гр}}$	81,1	81,1	
$G_{\text{ПСВ1}}^{\text{гр}}$	58	58	
$N_{\text{цн}}$	12,2	12	МВт
$N_{\text{кн}}$	4,3	4,3	
$N_{\text{пн}}$	22,8	22,6	
$N_{\text{гцн}}$	25	24,7	
$N_{\text{дн1}}$	0,15	0,15	
$N_{\text{дн2}}$	0,28	0,28	
$N_{\text{сн}}$	64,7	64,1	
$N_{\text{эл.расч}}$	1072,5	1062,2	
$Q_{\text{э}}$	3023,5	2993,6	
$t_{\text{сеп}}^{\text{вых}}$	164,43	164,43	°С
$t_{\text{ПП1}}^{\text{вых}}$	210,64	210,64	

$t_{ПП2}^{вых}$	260,86	260,86	
Δ	0,78	0,15	%

2.9. ВЫВОД ПО ГЛАВЕ 2.

В этой части проектировалась установка мощностью 1000 МВт и КПД 33 %.

В результате расчета энергоблока АЭС с реактором типа ВВЭР получены: (с КПД = 33,3 %).

Предусмотрены 7 регенеративных отборов пара турбины. Имеются 2 регенеративных подогревателя высокого давления ПВД № 1, 2; деаэратор; 4 регенеративных подогревателя низкого давления ПНД № 1, 2, 3, 4.

- Основные параметры контура рабочего тела: давление и температура генерируемого пара в горизонтальном парогенераторе: 6,5 МПа и 280 °С.
- Число регенеративных подогревателей: 4 подогревателя низкого давления и 2 подогревателя высокого давления, а также давление в отборах (см. табл. 2).
- расходы в элементах схемы .
- t-Q диаграмма ПГ
- Расход питательной воды составляет 1804 кг/с, расход теплоносителя - 19657 кг/с.
- электрическая мощность энергоблока - 1062 МВт.
- КПД станции нетто - 33,3 %.

Глава 3. НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ РЕАКТОРА ВВЭР-1000

3.1. Общие характеристики реактора ВВЭР-1000

Тип реактора – гетерогенный на тепловых нейтронах с водой.

Таблица 3.1

Общие характеристики реактора ВВЭР-1000

	$Q_р$	Тепловая мощность реактора	3292	МВт
	P_0	Давление в 1-ом контуре	12,7	МПа
	$T_{вых}$	Температура теплоносителя на выходе реактора	320	^oC
	$T_{вх}$	Температура теплоносителя на входе реактора	290	^oC
твэл	d_2	Диаметр твэла	0,95	см
	Топливо		UO_2	
	М. Обо	Материал оболочки	Zr	
	$\delta_{обо}$	Толщина стенки твэла	0,072	см
	$\delta_{заз}$	Толщина газового зазора твэла	0,006	см
	x_5	Обогащение ^{235}U	3,3%	
ТВС	$n_{твэл}$	Число твэлов	289	
	Тип решетки		Δ	
	a	Шаг твэл	1,29	см
АЗ	T_k	Время кампании	300	сутки
	$m=H_{аз}/D_{аз}$		1,11	

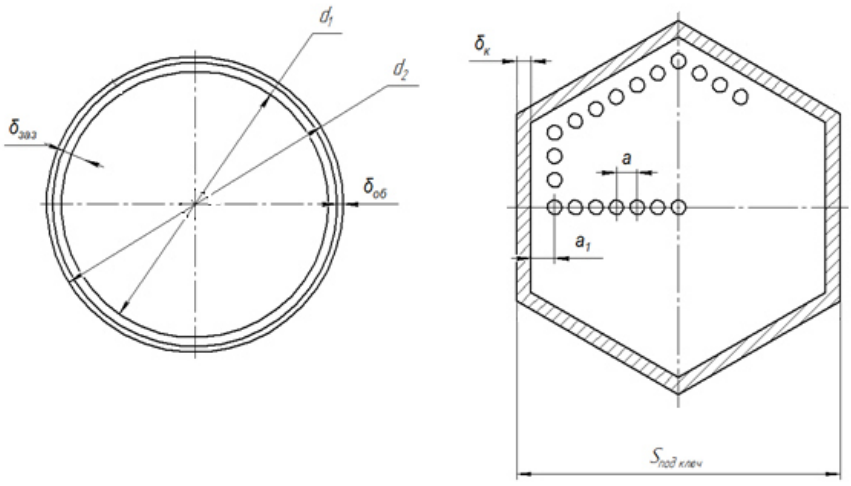

Рис. 3.1. Эскиз твэла и ТВС (шестигранная)

3.2. Конструтивный расчёт реактора

Необходимым условием выполнения нейтронно-физический расчет является определение нуклидного состава активной зоны. Это достигается проведением конструктивного расчёта на основе исходных данных (общей конструкции реактора, размеров различных элементов активной зоны, её состава). Это дает возможность определить концентрации всех элементов активной зоны (компонент), а также их доли в общем объеме зоны. [14]

Последовательность конструктивного расчета следующая:

3.2.1. Геометрические характеристики ТВС

Определяется установочный размер, расстояние от границы кассеты до крайнего твэла в ряду

$$a_1 = 0{,}825 \cdot (a - d_2) = 0{,}825 \cdot (12{,}9 - 9{,}5) = 2{,}81 \text{ мм}$$

Диаметр блок топлива

$$d_1 = d_2 - 2 \cdot (\delta_{\text{об}} + \delta_{\text{заз}}) = 9{,}5 - 2 \cdot (0{,}72 + 0{,}06) = 7{,}94 \text{ мм};$$

Определяется размер "под ключ» шестигранной бесчехловой кассеты

$$S_{\text{к}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot a \cdot \left(n_{\text{рядов}} - 1\right) + 2 \cdot (a_1 + \delta_{\text{к}}) + d_2$$

$$= \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 12{,}9 \cdot (21 - 1) + 2 \cdot (2{,}81 + 1{,}5) + 9{,}5 = 242 \text{ мм};$$

Где $n_{ряд}$ — число рядов твэлов в кассете (равно числу твэлов в центральном ряду кассеты)

Число рядов твэлов в кассете зависит от общего числа твэлов по формуле:

$$n_{\text{рядов}} = \sqrt{\frac{n_{\text{твэл}} - 1}{0{,}75} + 1} = \sqrt{\frac{289 - 1}{0{,}75} + 1} = 19{,}6$$

Принимаем $n_{ряд} = 21$.

Площадь живого сечения для прохода теплоносителя

$$F_{H_2O}^{к} = 0{,}866 \cdot (S_к - 2\delta_к)^2 - \frac{\pi \cdot {d_2}^2}{4} \cdot n_{твэл}$$

$$= 0{,}866 \cdot (242 - 2 \cdot 1{,}5)^2 - \frac{\pi \cdot 9{,}5^2}{4} \cdot 289 = 28984 \text{ мм}^2$$

Площадь кассеты, занятая конструкционным материалом

$$F_{к.м}^{к} = \frac{\pi}{4} \cdot \left[{d_2}^2 - (d_1 + 2 \cdot \delta_{заз})^2\right] \cdot n_{твэл} + 2\sqrt{3} \cdot \delta_к (S_к - \delta_к)$$

$$= \frac{\pi}{4} \cdot [9{,}5^2 - (7{,}94 + 2 \cdot 0{,}06)^2] \cdot 289) + 2\sqrt{3} \cdot 1{,}5(242 - 1{,}5) \ = 6989 \text{ мм}^2$$

Площадь кассеты, занятая топливом

$$F_{Т}^{к} = \frac{\pi \cdot {d_1}^2}{4} \cdot n_{твэл} = \frac{\pi \cdot 7{,}94^2}{4} \cdot 289 = 14311 \text{ мм}^2$$

Площадь кассеты, занятая газовым зазором

$$F_{з}^{к} = \frac{\pi}{4} \cdot \left[(d_2 - 2 \cdot \delta_{об})^2 - {d_1}^2\right] \cdot n_{твэл} = \frac{\pi}{4} \cdot [(9{,}5 - 2 \cdot 0{,}72)^2 - 7{,}94^2] \cdot 289$$

$$= 436 \text{ мм}^2;$$

Проверка расчета площадей

$$F^{К} = \sum_{i}^{n} F_i = F_{H_2O}^{к} + F_{к.м}^{к} + F_{Т}^{к} + F_{з}^{к}$$

$$= 28984 \ + 6989 \ + 14311 + 436 = 50720 \text{ мм}^2;$$

$$F^{К} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot {S_к}^2 = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 242^2 = 50718 \text{мм}^2$$

3.2.2. Геометрия А.З

Объем активной зоны

$$V_{\text{А.З}} = \frac{Q_p}{q_v} = \frac{3292}{100} = 32{,}92\text{м}^3$$

Где q_v - энергонапряженность активной зоны q_v=100 (МВт/м^3)

Диаметр активной зоны

$$D_{\text{А.З}} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot V_{\text{А.З}}}{\pi \cdot m}} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 32{,}92}{\pi \cdot 1{,}11}} = 3{,}4 \text{ м}$$

Где m - коэффициент, определяющий оптимальное с точки зрения утечки нейтронов соотношение размеров реактора по нескольким его координатам.

Согласно теории реакторов утечка нейтронов происходит через поверхность активной зоны, поэтому в целях минимизации утечки при конструировании реактора следует принимать такие соотношения размеров, при которых имеется минимальное соотношение $\frac{F_{АЗ}}{V_{АЗ}}$. Для цилиндра это достигается при $H_{аз} = D_{аз}$. Однако с точки зрения физики удельная (отнесенная к единице поверхности) утечка нейтронов через боковые грани оказывается больше, чем через торцевые. Задано m = 1,11

Высота активной зоны

$$H_{\text{А.З}} = m \cdot D_{\text{А.З}} = 1{,}11 \cdot 3{,}4 = 3{,}8 \text{ м}$$

Площадь поперечного сечения активной зоны

$$F_{\text{А.З}} = \frac{\pi \cdot {D_{\text{А.З}}}^2}{4} = \frac{\pi \cdot 3{,}4^2}{4} = 9{,}08 \text{ м}^2$$

Число кассет

$$n_{\text{кас}} = \frac{F_{\text{А.З}}}{F^{\text{К}}} = \frac{9{,}08}{50720 \cdot 10^{-6}} = 180$$

3.2.3. Объёмные доли компонент активной зоны

$$\varepsilon_{H_2O} = \frac{F^{\text{К}}_{H_2O}}{F^{\text{К}}} = \frac{28984}{50720} = 0{,}571;$$

$$\varepsilon_{\text{к.м}} = \frac{F^{\text{К}}_{\text{к.м}}}{F^{\text{К}}} = \frac{6989}{50720} = 0{,}138;$$

$$\varepsilon_{\text{Т}} = \frac{F^{\text{К}}_{\text{Т}}}{F^{\text{К}}} = \frac{14311}{50720} = 0{,}282;$$

$$\varepsilon_{\text{З}} = \frac{F^{\text{К}}_{\text{З}}}{F^{\text{К}}} = \frac{436}{50720} = 0{,}009;$$

3.2.4. Массовый расход теплоносителя через активную зону

$$G_{\text{А.З}} = \frac{Q_{\text{р}}}{h_{\text{вых}}(\text{P}_I, \text{T}_{\text{вых}}) - i_{\text{вх}}(\text{P}_I, \text{T}_{\text{вх}})} = \frac{3292 \cdot 10^3}{143{,}79 - 1268{,}74} = 19245{,}8\,\frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

Где $i_{вых}, i_{вх}$ - кДж/кг - энтальпии теплоносителя соответственно на входе в реактор и на выходе из него при давлении P_0 = 12,7 МПа.

$\text{T}_{\text{вых}} = 320\ ℃;$

$\text{T}_{\text{вх}} = \text{T}_{\text{вых}} - \Delta\text{T}_I = 320 - 30 = 290\ ℃;$

$i_{\text{вх}} = 1268{,}74\,\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}\ ;\ i_{\text{вых}} = 1439{,}79\,\frac{\text{кДж}}{\text{кг}};$

3.2.5. Средняя скорость

$$\bar{W} = \frac{G_{\text{А.З}}}{\bar{\rho} \cdot F^{\text{К}}_{H_2O} \cdot n_{\text{кас}}} = \frac{19245{,}8}{709{,}88 \cdot 28984 \cdot 10^{-6} \cdot 180} = 5{,}2\ \text{м/с}$$

Где $\bar{\rho}$ – средняя плотность теплоносителя в А.З при средней температуре;

$\overline{\text{T}} = \frac{\text{T}_{\text{вх}} + \text{T}_{\text{вых}}}{2} = \frac{320+290}{2} = 305\ ℃;$

$\bar{\rho}(\overline{\text{T}}) = 709{,}88\ \text{кг/м}^3;$

3.3. РАСЧЕТ «ГОРЯЧЕГО» РЕАКТОРА

Этот расчет является одним из необходимых этапов для определения важной с точки зрения безопасности эксплуатации реактора характеристики — плотностного температурного эффекта. Он выполняется по методике, представленной выше, с той лишь разницей, что все характеристики взаимодействия нейтронов с ядрами среды находятся в

таблицах физических величин при новом значении $T_{нг}$, которое найдется при новом значении средней температуры теплоносителя.

В расчёте на «горячее» состояние также будет получена итоговая характеристика — запас реактивности реактора. Разность между двумя значениями$\rho_{зап}$ даёт величину интегрального плотностного температурного эффекта реактивности. [14]

3.3.1. Определение ядерных концентраций компонент А.З

В расчете будут использованы как концентрации ядер компонент активной зоны в самом материале (концентрации «в самой себе»), так и концентрации в элементарной ячейке, построенной на основе ТВС. Концентрация в самом материале (1/см3) определяется по известной формуле Авогадро, [15]

$$N_i = \frac{\gamma_i}{M_i} N_A,$$

Где γ_i, г/см3 - плотность материала (компоненты); N_A = 0.6023/.10^{24},1/моль – число Авогадро, представляющее собой одинаковое для всех веществ количество ядер или молекул, содержащихся в 1 моле вещества; A_i - атомная масса материала, выраженная в атомных единицах массы.

При определении ядерной концентрации воды плотность определяется в расчёте на «горячее» состояние реактора при температуре 565,5 К.

Т.к. топливо находится в молекуле UO_2, поэтому в начало определяется концентрация композиции (UO_2):

$$M_{UO_2} = M_{235} \cdot x_5 + M_{238} \cdot (1 - x_5) + M_{O_2}$$

- Концентрация молекул топлива «в самом себе»

$$N_{UO_2} = \frac{\gamma_{UO_2} N_a}{M_{UO_2}}$$

- Концентрация ядер урана «в самом себе»

$$N_U = N_{UO_2}$$

- Концентрация ядер U^{235} «в самом себе»

$$N_5 = N_U x_5$$

- Концентрация ядер U^{238} «в самом себе»

$$N_8 = N_U x_8$$

Для получения величин концентраций компонент активной зоны в элементарной ячейке необходимо найденные значения концентраций (концентрации «в самом себе») для каждой компоненты умножить на соответствующую долю этой компоненты в ячейке ($\varepsilon_{яч}^{i}$).

$$N_i^{яч} = N_i \varepsilon_i^{яч}$$

Ядерная концентрация теплоносителя:

$$\gamma_{H_2O}(12{,}7\ \text{МПа}; 305\ ℃) = 0{,}71\ \text{г/см}^3$$

$$N_{H_2O} = \frac{\gamma_{H_2O} \cdot N_A}{\mathrm{M}_{H_2O}} = \frac{0{,}71 \cdot 0{,}6023 \cdot 10^{24}}{18{,}011} = 2{,}38 \cdot 10^{22}\ \text{см}^{-3}$$

Все остальные не изменяется в Расчёте «горячего» реактора.

Результаты показаны в таблице 3.2.

Таб. 3.2. Макроскопические сечение гомогенизированной ячейки для «горячего» реактора

Элемент	ε_i; %	N_i*10^{-24} ; cm^{-3}	$N_i^{яч}*10^{-24}$; cm^{-3}	σ_a*10^{-24} (E=0.025эВ); cm^2	$\xi\sigma_s*10^{-24}$ (E=1эВ); cm^2	$\sum_a*10^{-24}$ (E=0.025эВ); cm^{-1}	$\xi\sum_s*10^{-24}$ (E=1эВ); cm^{-1}
H_2O	0,571	0,0238	0,0136	0,644	41	0,00876	0,558
U^5	0,282	0,000809	0,000228	683	0,126	0,156	2,87E-05
U^8	0,282	0,0237	0,00668	2,71	0,075	0,0181	0,000501
O	0,282	0,049	0,0138	2,00E-04	0,45	2,76E-06	0,00621
He	0,009	2,68E-05	2,40E-07	0,007	0	1,68E-09	0
Zr	0,138	0,0425	0,00587	0,185	0,404	0,00109	0,00237
					сумма	**0,184**	**0,567**

3.3.2. Температура нейтронного газа

$$\mathrm{T_{н.г}} = \mathrm{T_0}\left[1 + 1{,}4\frac{\Sigma_\mathrm{a}(\mathrm{T_0})}{\xi\Sigma_\mathrm{s}|_{1\text{эВ}}}\right] = 578\left[1 + 1{,}4\frac{0{,}131}{0{,}567}\right] = 766$$

$$\Sigma_\mathrm{a}(\mathrm{T_0}) = \sum_i \Sigma_{\mathrm{a}_i}(293)\sqrt{\frac{293}{\mathrm{T_0}}} = 0{,}184\sqrt{\frac{293}{578}} = 0{,}131$$

Где $\mathrm{T_0}$, К - средняя температура замедлителя (в расчёте «горячего» реактора эта температура принимается равной 578 К.

$\Sigma_a(T_0)_{a,i} = \sum_i \sigma_i \cdot N_i^{яч}$, 1/см — сумма макроскопических поперечных сечений поглощения нейтронов для всех компонент активной зоны, осредненных по температуре замедлителя. Её значение показано в таб. 3.2.

$\xi\Sigma_{s|1эВ} = \sum_i \xi\sigma_{s|1эВ} \cdot N_i^{яч}$, 1/см — замедляющая способность активной зоны, определяемая как сумма этих характеристик, найденных для каждой компоненты в справочных данных для энергии нейтронов, равной 1эВ. Её значение показано в таб. 3.2.

3.3.3. Определение микросечений и макросечений при Тн.г

$$\sigma_{ai}(\mathrm{T_{н.г}}) = \sigma_{ai}(293)\cdot\frac{\sqrt{\pi}}{2}\sqrt{\frac{293}{\mathrm{T_{н.г}}}} = 0{,}548\cdot\sigma_{ai}(293)$$

$$\sigma_{a,5}(\mathrm{T_{н.г}}) = \sigma_{a,5}(293)\cdot\frac{\sqrt{\pi}}{2}\sqrt{\frac{293}{\mathrm{T_{н.г}}}}\cdot g_{a,5}(\mathrm{T_{н.г}}) = 683\frac{\sqrt{\pi}}{2}\sqrt{\frac{293}{766}}\cdot 0{,}935 = 350\ (\text{барн})$$

$$\sigma_{f,5}(\mathrm{T_{н.г}}) = \sigma_{f,5}(293)\cdot\frac{\sqrt{\pi}}{2}\sqrt{\frac{293}{\mathrm{T_{н.г}}}}\cdot g_{f,5}(\mathrm{T_{н.г}}) = 582\frac{\sqrt{\pi}}{2}\sqrt{\frac{293}{766}}\cdot 0{,}935 = 298{,}3\ (\text{барн})$$

$$\sigma_{si}(\mathrm{T_{н.г}}) = \sigma_{si}(293)\cdot\frac{\sqrt{\pi}}{2}\sqrt{\frac{293}{\mathrm{T_{н.г}}}} = 0{,}548\sigma_{si}(293)$$

$$\sigma_{tr_{H_2O}}(\mathrm{T_{н.г}}) = \sigma_{tr_{H_2O}}(293)\cdot\frac{\sqrt{\pi}}{2}\sqrt{\frac{293}{\mathrm{T_{н.г}}}} = 55\frac{\sqrt{\pi}}{2}\sqrt{\frac{293}{766}} = 30{,}2\ (\text{барн})$$

где $g_{f,5}(T_{нг})$ и $g_{a,5}(T_{нг})$ – коэффициенты (g-факторы), учитывающие отклонение действительного изменения σ от закона «1/v». Учитываются для U^{235} и определяются по таблицам в зависимости от величины $T_{нг}$. (приложение [2])

Результаты показаны в таблице 3.3.

Выполняется расчёт макросечений перемножением соответствующего микросечения на концентрацию компоненты в ячейке активной зоны.

$$\sum_{ji}(T_{нг}) = N_i^{яч}\sigma_{ji}(T_{нг}),$$

где индекс «i» принадлежит i-ой компоненте, а «j» указывает на вид взаимодействия нейтрона с ядром (поглощение –«a», поглощение с делением – « f», рассеяние – «s», транспорт – «tr»).

Таб. 3.3. Микросечение и макросечение компонентов при Тн.г = 766

Элемент	σ_a*10^{24} (Тн.г); cm^2	$\sum_a$(Тн.г); cm^{-1}	σ_s*10^{24} (E=0.025эВ); cm^2	σ_s*10^{24} (Тн.г); cm^2	$\sum_s$ (Тн.г); cm^{-1}	$\sigma_{tr}*10^{24}$ (E=0.025эВ); cm^2	$\sigma_{tr}*10^{24}$ (Тн.г); cm^2	$\sum_{tr}$ (Тн.г); cm^{-1}
H_2O	0,353	0,0048	110	60,3	0,82	55	30,15	0,41
U^5	350	0,0798	13,8	7,56	0,00172	15	15	0,00342
U^8	1,49	0,00995	8,9	4,88	0,0326	9	9	0,0601
O	1,10E-04	1,51E-06	3,76	2,06	0,028	3,6	3,6	0,0497
He	0,00384	9,22E-10	0,76	0,417	1E-07	0,66	0,66	1,58E-07
Zr	0,101	0,000593	6,4	3,51	0,021	6,14	6,14	0,036
		0,0951			**0,903**			**0,555**

3.3.4. Расчёт квадрата длины диффузии тепловых нейтронов

$$L^2 = [3 \cdot \Sigma_a(T_{н.г}) \cdot \Sigma_s(T_{н.г})]^{-1} = [3 \cdot 0{,}0951 \cdot 0{,}555]^{-1} = 6{,}32(см^2)$$

$\Sigma_a(T_{н.г}) = \sum_i^n (\sigma_{ai}(T_{н.г}))N_i^{яч}$ - макросечение поглощения активной зоны для тепловой нейтронов, определяемая как сумма макросечений поглощения всех компонент активной зоны для этих нейтронов при $T_{н.г}$: $\Sigma_a(T_{н.г}) = 0{,}0951$.

$\Sigma_{tr}(T_{н.г}) = \sum_{i}^{n}(\sigma_{tri}(T_{н.г}))N_i^{яч}$ - транспортное макросечение активной зоны для тепловой нейтронов, определяемая как сумма транспортных макросечений всех компонент активной зоны для этих нейтронов при $T_{н.г}$ $\Sigma_s(T_{н.г}) = 0{,}555$.

3.3.5. Расчёт возраста тепловых нейтронов

$$\tau = \frac{u_{гр}}{3\xi\sum_s^{б}\sum_{tr}^{б}}$$

где $u_{гр} = \ln\left(\frac{2.10^6}{E_{гр}}\right)$ граничная летаргия, величина, определяющая завершение процесса замедления нейтронов и зависящая от величины энергии нейтронов на стыке спектров замедляющихся и тепловых нейтронов (энергии «сшивки»). Эта энергия определяется из решения трансцендентного уравнения

$$x_{гр}^2 e^{-x_{гр}} = \frac{\sum_a(T_{нг})}{\xi\sum_s^{рез}}$$

где $\xi\sum_s^{рез} = \sum_i^n(\xi\sigma_s^{рез})N_i^{яч}$ — замедляющая способность активной зоны для резонансных нейтронов [16], определяемая как сумма замедляющих способностей всех компонент активной зоны для этих нейтронов $\xi\Sigma_s^{рез} = 0{,}557(см^{-1})$; при этом $E_m = kT_{нг}$, где $k = 8.61\cdot10^{-5}$, эВ/К – постоянная Больцмана.

$$x_{гр}^2 \cdot e^{-x_{гр}} = \frac{0{,}0951}{0{,}557} => \begin{cases} x_{гр} = -0{,}347 \\ x_{гр} = 4{,}98 \end{cases}$$

Т.к. $x_{гр}$ не может быть отрицательным, то принимаем $x_{гр}$ = 4,98, получено

$$E_{гр} = x_{гр} \cdot E_т = 4{,}98 \cdot 8{,}61 \cdot 10^{-5} \cdot 766 = 0{,}328 \text{ (эВ)}$$

$\xi\sum_s^{б} = \sum_i^n(\xi\sigma_s^{б})N_i^{яч}$ - замедляющая способность активной зоны для быстрых нейтронов, определяемая как сумма замедляющих способностей всех компонент активной зоны для этих нейтронов $\xi\Sigma_s^{б} = 0{,}253(см^{-1})$

$\Sigma_{tr}^{б} = \sum_{i}^{n} (\sigma_{tr}^{б}) N_i^{яч}$ - транспортное макросечение активной зоны для быстрых нейтронов, определяемая как сумма транспортных макросечений всех компонент активной зоны для этих нейтронов $\Sigma_{tr}^{б} = 0{,}268 (\text{см}^{-1})$

Считаем возраст тепловых нейтронов

$$\tau = \frac{ln\left(\frac{2 \cdot 10^6}{\text{E}_{\text{гр}}}\right)}{3 \cdot \xi \Sigma_s^{б} \cdot \Sigma_{tr}^{б}} = \frac{ln\left(\frac{2 \cdot 10^6}{0{,}328}\right)}{3 \cdot 0{,}253 \cdot 0{,}268} = 76{,}7\ (\text{см}^2)$$

3.3.6. Материальный параметр реактора

$$\text{B}^2 = \left(\frac{\pi}{\text{H}'}\right)^2 + \left(\frac{2{,}045}{R'}\right)^2 = \left(\frac{\pi}{400}\right)^2 + \left(\frac{2{,}045}{180}\right)^2 = 1{,}9 \cdot 10^{-4} (\text{см}^2)$$

где $H' = H_{аз} + 2\delta$ и $R' = R_{аз} + \delta$, см — экстраполированные (увеличенные на величину эффективной добавки) размеры активной зоны δ = 10 см (задано).

3.3.7. Расчёт коэффициент K∞

$$K_\infty = \eta \cdot \varepsilon \cdot \varphi \cdot \theta$$

а) Число быстрых нейтронов нового поколения, образующихся при поглощении одного теплового нейтрона в топливе (η).

$$\eta = \frac{\nu_5 \Sigma_{f5}}{\Sigma_{a5} + \Sigma_{a8} + \Sigma_{aO_2}} = \frac{2{,}42 \cdot 0{,}068}{0{,}0798 + 0{,}00995 + 1{,}51 \cdot 10^{-6}} = 1{,}83$$

Где $\nu_5 = 2{,}42$.

б) Коэффициент размножения на быстрых нейтронах (ε). [17]

$$\varepsilon = \frac{1{,}34 + p\varepsilon_{\text{бл}}}{1 + p}$$

где p – опытный параметр, учитывающий вероятность для быстрого нейтрона испытать первое соударение (взаимодействие) с ядрами «своего» блока, а $\varepsilon_{\text{бл}}$ — коэффициент размножения на быстрых нейтронах для уранового блока диаметром $d_{\text{бл}}$ (по урану) и ядерной концентрацией урана N_U для случая, когда блок окружён бесконечным замедлителем.

$$\varepsilon_{\text{бл}} = 1 + 0{,}27 \cdot d_{\text{бл}} \cdot N_u \cdot 10^{-24} = 1 + 0{,}27 \cdot 0{,}95 \cdot 0{,}0245 = 1{,}0063$$

$$P = \frac{0{,}154 \cdot \overline{\gamma_{H_2O}} \cdot F_{H_2O}^{\text{твэл}}}{N_u \cdot 10^{-24} \cdot F_{\text{бл}}} = \frac{0{,}154 \cdot 0{,}71 \cdot 1}{N_u \cdot 10^{-24} \cdot 0{,}709} = 6{,}31$$

$$F_{H_2O}^{\text{твэл}} = \frac{F_{H_2O}^{K}}{n_{\text{твэл}}} = \frac{289{,}84}{289} \approx 1(\text{см}^2)$$

$$F_{\text{бл}} = \pi \cdot \frac{d_2^2}{4} = \pi \cdot \frac{0{,}95^2}{4} = 0{,}709(\text{см}^2)$$

Коэффициент размножения на быстрых нейтронах:

$$\varepsilon = \frac{1{,}34 + p\varepsilon_{\text{бл}}}{1 + p} = \frac{1{,}34 + 6{,}31 \cdot 1{,}0063}{1 + 1{,}0063} = 1{,}05$$

в) Вероятность избежать резонансного поглощения нейтронов (φ).

$$\varphi = exp\left(-\frac{N^{яч}{}_i I_i}{\zeta \sum_s^{рез}} \right)$$

где I_i, барн — т.н. «эффективный резонансный интеграл» для i-той компоненты активной зоны; $\zeta \sum_s^{рез}$ 1/см — замедляющая способность активной зоны для резонансных нейтронов (находится как сумма замедляющих способностей всех компонент активной зоны) $\xi\Sigma_s^{\text{рез}} = 0{,}557(\text{см}^{-1})$.

Значения эффективных резонансных интегралов для различных элементов задаются в приложении [3]. Для расчета I_8 можно воспользоваться формулой Гуревича – Померанчука:

$$\mathrm{I}_8 = 4{,}9 + \frac{2{,}08 П_m}{\sqrt{\bar{l} N_8^{бл} 10^{-24}}}$$

где Пт = 0,77 + 0,0135$\sqrt{T_U}$ — температурная поправка, учитывающая «уширение» резонансных уровней (эффекта Доплера); T_U, K - средняя температура уранового блока; $\bar{l}, см$ средняя хорда, характеризующая пробег нейтрона в блоке.

$$П_T = 0{,}77 + 0{,}0135\sqrt{T_U} = 0{,}77 + 0{,}0135\sqrt{978} = 1{,}19$$

$$T_U = T_{H_2O} + 400 = 978K$$

$$\bar{l} = d_2\sqrt{n_{\text{твэл}}} = 0{,}95\sqrt{289} = 16{,}2 \text{ (см)}$$

$$I_8 = 4{,}9 + \frac{2{,}08 \cdot 1{,}19}{\sqrt{16{,}2 \cdot 6{,}68 \cdot 10^{-3}}} = 12{,}4 \text{ (барн)}$$

Вероятность избежать резонансного поглощения нейтронов:

$$\varphi = \prod_{i=1}^{6} \varphi_i = 0{,}747$$

Элемент	H_2O	U_5	U_8	O	He	Zr
I_8	0	271	12,4	0	0	3
φ	1	0,895	0,862	1	1	0,969

г) Коэффициент использования тепловых нейтронов (θ).

$$\theta = \frac{\Sigma_{aT}}{\Sigma_{aT} + 2{,}3 \cdot \Sigma_{aZr} + 2{,}86 \cdot \Sigma_{aH_2O}} = \frac{0{,}0898}{0{,}0898 + 2{,}3 \cdot 5{,}93 \cdot 10^{-4} + 2{,}68 \cdot 4{,}8 \cdot 10^{-3}}$$

$$= 0{,}856$$

где коэффициенты 2,3 и 2,86 учитывают отмеченную неравномерность распределения нейтронного потока по сечению расчетной ячейки и получены из анализа опыта эксплуатации прототипных реакторов.

$$K_\infty = 1{,}83 \cdot 1{,}05 \cdot 0{,}747 \cdot 0{,}856 = 1{,}23$$

3.3.8. Эффективный коэффициент размножения нейтронов

$$K_{\text{эф}} = K_\infty \cdot \frac{e^{-B^2\tau}}{1 + B^2L^2} = 1{,}25 \cdot \frac{e^{-1{,}9 \cdot 10^{-4} \cdot 76{,}7}}{1 + 1{,}9 \cdot 10^{-4} \cdot 6{,}32} = 1{,}21$$

3.3.9. Запас реактивности реактора

$$\rho_{\text{зап}}^{\text{г}} = \frac{K_{\text{эф}} - 1}{K_{\text{эф}}} = \frac{1{,}21 - 1}{1{,}21} = 0{,}174$$

3.4. РАСЧЕТ «ГОРЯЧЕГО» ОТРАВЛЕННОГО РЕАКТОРА НА КОНЕЦ КАМПАНИИ

3.4.1. Физические процессы, влияющие на изменение нуклидного состава активной зоны

В ходе кампании физические характеристики активной зоны претерпевают существенные изменения, прежде всего из-за процессов, приводящих к изменению изотопного состава топлива. Это процессы: выгорания самого топлива (т.е. уменьшения концентрации U^{235}), накопления продуктов деления (зашлаковывание активной зоны), появление в активной зоне отравителей — материалов с большими сечениями поглощения тепловых нейтронов (ядер Xe^{135} и Sm^{149}). Перечисленные процессы приводят к постепенному уменьшению с течением кампании запаса реактивности.

Одновременно идет еще один процесс – воспроизводство топлива, которое заключается в генерации при работе реактора вторичного делящегося нуклида Pu^{239}. Этот процесс приводит к повышению запаса реактивности реактора, что частично компенсирует потери реактивности, вызываемые первыми тремя процессами. Поэтому основной задачей в расчете является определение количественных характеристик изменяющегося нуклидного состава топлива, которые определяют величину эффективного коэффициента размножения нейтронов $K_{эф}$.

Далее переходим к расчету $K_{эф}$ для 3-х значений обогащения топлива, после чего можно построить график зависимости запаса реактивности реактора от принятого обогащения. Требуемое обогащение топлива делящимся нуклидом U^{235} определится на этом графике как проекция на ось абсцисс точки пересечения с зависимостью $\rho(x_5)$ величины оперативного запаса реактивности ρ^{on}. Оперативным запасом реактивности реактора называется весь запас реактивности, который в данный момент

кампании может быть высвобожден оператором за счёт извлечения из активной зоны всех поглотителей нейтронов, имеющих механический привод.

Далее мы используем индексы $^{(2)}$ и $^{(3)}$ для показания результатов, соответствующих обогащения топлива $x_5^{(2)} = 2{,}9\%$ и $x_5^{(3)} = 2{,}5\%$

3.4.2. Последовательность расчета

Средняя плотность потока тепловых нейтронов на начало кампании:

$$\phi_{\text{н.к}} = \frac{Q_p \cdot 3{,}4 \cdot 10^{16}}{\Sigma_{f5}(\text{Т}_{\text{Н.Г}}) \cdot V_{\text{А.З}}} = \frac{3292 \cdot 3{,}4 \cdot 10^{16}}{0{,}068 \cdot 32{,}92 \cdot 10^{6}} = 5 \cdot 10^{13}\ \frac{\text{нейт}}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}$$

$$\phi^2_{\text{н.к}} = 5{,}67 \cdot 10^{13}$$

$$\phi^3_{\text{н.к}} = 6{,}42 \cdot 10^{13}$$

3.4.3. Концентрация U5 в конце кампании

$$N_5^{\text{кк}} = N_{5,0}^{\text{Т}} \cdot (1 - \sigma_{a5}(\text{Т}_{\text{Н.Г}}) \cdot \phi_{\text{н.к}} \cdot \text{Т}_{\text{к}})$$

$$= 8{,}09 \cdot 10^{20} \cdot (1 - 350 \cdot 10^{-24} \cdot 5 \cdot 10^{13} \cdot 300 \cdot 86400)$$

$$= 4{,}42 \cdot 10^{20}\ \text{см}^{-3}$$

$$N_5^{\text{кк}(2)} = 3{,}4 \cdot 10^{20}\ \text{см}^{-3}$$

$$N_5^{\text{кк}(2)} = 2{,}46 \cdot 10^{20}\ \text{см}^{-3}$$

3.4.4. Изменение концентрация U5

$$\Delta N_5 = N_{5,0}^{\text{Т}} \cdot \sigma_{a5}(\text{Т}_{\text{Н.Г}}) \cdot \phi_{\text{н.к}} \cdot \text{Т}_{\text{к}}$$

$$= 8{,}09 \cdot 10^{20} \cdot 350 \cdot 10^{-24} \cdot 5 \cdot 10^{13} \cdot 300 \cdot 86400 = 3{,}67 \cdot 10^{20}\text{см}^{-3}$$

$$\Delta N_5^2 = 3{,}7 \cdot 10^{20}\text{см}^{-3}$$

$$\Delta N_5^3 = 3{,}66 \cdot 10^{20}\text{см}^{-3}$$

3.4.5. Стационарная концентрация Pu9 в конце кампании:

$$N_9^{\text{Т}} = \frac{N_8^{\text{Т}} \cdot \sigma_{a8}(\text{Т}_{\text{Н.Г}}) + (1-\varphi) \cdot \eta \cdot \varepsilon \cdot N_5^{\text{Т}} \cdot \sigma_{a5}(\text{Т}_{\text{Н.Г}}) \cdot e^{-B^2 \cdot \tau_{\text{рез}}}}{\sigma_{a9}(\text{Т}_{\text{Н.Г}})}$$

$$= \frac{0{,}0237 \cdot 1{,}51 + (1 - 0{,}747) \cdot 1{,}83 \cdot 1{,}05 \cdot 0{,}000809 \cdot 350 \cdot e^{-1{,}91 \cdot 10^{-4} \cdot 76{,}7}}{1251}$$

$$= 1{,}37 \cdot 10^{20}\ \text{см}^{-3}$$

где:

$$\tau_{\text{рез}} = \frac{U_{\text{рез}}}{3 \cdot \xi \Sigma_s^{\text{рез}} \cdot \Sigma_{tr}^{\text{б}}} = \frac{11{,}1}{3 \cdot 0{,}557 \cdot 0{,}555} = 12;\ U_{\text{рез}} = \ln\left(\frac{2 \cdot 10^6}{\text{Е}_{\text{рез}}}\right) = 11{,}1;\ \text{Е}_{\text{рез}} =$$

30 эВ .

$$\sigma_{a9}(\mathrm{T_{Н.Г}}) = \sigma_{a9}(293\mathrm{К}) \cdot \frac{\sqrt{\pi}}{2} \cdot \sqrt{\frac{293}{\mathrm{T_{Н.Г}}}} \cdot g_a = 1028 \cdot \frac{\sqrt{\pi}}{2} \cdot \sqrt{\frac{293}{766}} \cdot 2{,}22$$

$$= 1251(\text{барн})$$

$$N_9^{\mathrm{T}(2)} = 1{,}24 \cdot 10^{20}\ \text{см}^{-3}$$

$$N_9^{\mathrm{T}(2)} = 1{,}1 \cdot 10^{20}\ \text{см}^{-3}$$

3.4.6. Концентрация шлаков

$$N_{\text{шл}} = 2 \cdot \Delta N_5 \cdot \frac{\sigma_{f5}(\mathrm{T_{Н.Г}})}{\sigma_{a5}(\mathrm{T_{Н.Г}})} = 2 \cdot 3{,}67 \cdot 10^{20} \cdot \frac{298{,}3}{350} = 6{,}26 \cdot 10^{20}\ \text{см}^{-3}$$

$$N_{\text{шл}}^{(2)} = 6{,}31 \cdot 10^{20}\ \text{см}^{-3}$$

$$N_{\text{шл}}^{(3)} = 6{,}23 \cdot 10^{20}\ \text{см}^{-3}$$

3.4.7. Плотность потока тепловых нейтронов на конце кампании

$$\phi_{\text{к.к}} = \phi_{\text{н.к}} \cdot \frac{N_{5,0}^{\mathrm{T}} \cdot \sigma_{f5}(\mathrm{T_{Н.Г}})}{N_5^{\text{кк}} \cdot \sigma_{f5}(\mathrm{T_{Н.Г}}) + N_9^{\mathrm{T}} \sigma_{f9}(\mathrm{T_{Н.Г}})}$$

$$= 5 \cdot 10^{13} \cdot \frac{0{,}000809 \cdot 298{,}3}{4{,}42 \cdot 10^{-4} \cdot 298{,}3 + 1{,}37 \cdot 10^{-4} \cdot 903} = 9{,}15 \cdot 10^{13}\ \frac{\text{нейт}}{\text{см}^2 \cdot \text{с}};$$

$$\phi_{\text{к.к}}^2 = 1{,}18 \cdot 10^{14}\ \frac{\text{нейт}}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}$$

$$\phi_{\text{к.к}}^3 = 1{,}59 \cdot 10^{14}\ \frac{\text{нейт}}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}$$

$$\sigma_{f9}(\mathrm{T_{Н.Г}}) = \sigma_{f9}(293\mathrm{К}) \cdot \frac{\sqrt{\pi}}{2} \cdot \sqrt{\frac{293}{\mathrm{T_{Н.Г}}}} \cdot g_f = 742 \cdot \frac{\sqrt{\pi}}{2} \cdot \sqrt{\frac{293}{766}} \cdot 2{,}22 =$$

$$903(\text{барн})$$

3.4.8. Стационарная концентрация Xe135 в конце кампании

$$N_{Xe}^{\text{ст}} = \frac{0{,}063 \cdot \sigma_{f5}(\mathrm{T_{Н.Г}}) \cdot \phi_{\text{к.к}} \cdot N_5^{\text{кк}}}{0{,}214 \cdot 10^{-4} + \sigma_{aXe}(\mathrm{T_{Н.Г}}) \cdot \phi_{\text{к.к}}}$$

$$= \frac{0{,}063 \cdot 298{,}3 \cdot 10^{-24} \cdot 9{,}15 \cdot 10^{13} \cdot 4.42 \cdot 10^{20}}{0{,}214 \cdot 10^{-4} + 1{,}49 \cdot 10^{-18} \cdot 9{,}15 \cdot 10^{13}} = 5{,}57 \cdot 10^{15}\ \text{см}^{-3};$$

$$\sigma_{a_{Xe}}(\mathrm{T_{Н.Г}}) = \sigma_{a_{Xe}}(293\mathrm{К}) \cdot \frac{\sqrt{\pi}}{2} \cdot \sqrt{\frac{293}{\mathrm{T_{Н.Г}}}} = 2{,}72 \cdot 10^6 \cdot \frac{\sqrt{\pi}}{2} \cdot \sqrt{\frac{293}{766}}$$

$$= 1{,}49 \cdot 10^6(\text{барн})$$

$$N_{Xe}^{\text{ст}(2)} = 4{,}28 \cdot 10^{15}\ \text{см}^{-3}$$

$$N_{Xe}^{\text{ст}(3)} = 3{,}11 \cdot 10^{15}\ \text{см}^{-3}$$

3.4.9. Стационарная концентрация Sm149 в конце кампании

$$N_{Sm}^{\text{ст}} = \frac{0{,}014 \cdot (N_5^{\text{кк}} \cdot \sigma_{f5}(\mathrm{T_{Н.Г}}) + N_9^{\mathrm{T}} \sigma_{f9}(\mathrm{T_{Н.Г}}))}{\sigma_{aSm}(\mathrm{T_{Н.Г}})}$$

$$= \frac{0{,}014 \cdot (298{,}3 \cdot 4{,}42 \cdot 10^{-4} + 903 \cdot 1{,}37 \cdot 10^{-4})}{2{,}24 \cdot 10^{-20}} = 1{,}6 \cdot 10^{17}\ \text{см}^{-3};$$

$$\sigma_{a_{Sm}}(\mathrm{T_{Н.Г}}) = \sigma_{a_{Sm}}(293\mathrm{К}) \cdot \frac{\sqrt{\pi}}{2} \cdot \sqrt{\frac{293}{\mathrm{T_{Н.Г}}}} = 4{,}08 \cdot 10^4 \cdot \frac{\sqrt{\pi}}{2} \cdot \sqrt{\frac{293}{766}}$$

$$= 2{,}24 \cdot 10^4(\text{барн})$$

$$N_{Sm}^{\text{ст}(2)} = 1{,}31 \cdot 10^{17}\ \text{см}^{-3}$$

$$N_{Sm}^{\text{ст}(3)} = 1{,}05 \cdot 10^{17}\ \text{см}^{-3}$$

Таб. 3.4. Макроскопические сечение гомогенизированной ячейки для «горячего» реактора на конце кампании для x_5 = 3,3%.

Элемент	ε_i; %	N_i*10^{-24}; $см^{-3}$	$N_i^{яч}*10^{-24}$; $см^{-3}$	σ_a*10^{24} (E=0.025эВ); $см^2$	$\xi\sigma_s*10^{24}$ (E=1эВ); $см^2$	$\sum_a$ (E=0.025эВ); $см^{-1}$	$\xi\sum_s$ (E=1эВ); $см^{-1}$
H_2O	0,571	0,0238	0,014	0,644	41	0,009	0,574
U^5	0,282	4,42E-04	0,000125	683	0,126	0,0854	1,58E-05
U^8	0,282	0,0237	0,00668	2,71	0,075	0,0181	0,000501
O	0,282	0,049	0,0138	2,00E-04	0,45	2,76E-06	0,00621
He	0,009	2,68E-05	2,41E-07	0,007	0	1,69E-09	0
Zr	0,138	0,0425	0,00587	0,185	0,135	0,00109	0,000792
Pu^9	0,282	1,37E-04	3,86E-05	1028	0,083	0,0397	3,21E-06
Xe^5	0,282	5,57E-09	1,57E-09	2,72E+06	0	0,00427	0
Sm^9	0,282	1,60E-07	4,51E-08	4,08E+04	0	0,00184	0
Шлаки	0,282	6,26E-04	1,76E-04	50	0	0,00882	0
					Сумма	**0,168**	**0,582**

3.4.10. Температура нейтронного газа

$$\mathrm{T_{н.г}} = \mathrm{T_0}\left[1 + 1{,}4\frac{\Sigma_\mathrm{a}(\mathrm{T_0})}{\xi\Sigma_\mathrm{s}|_{1эВ}}\right] = 578\left[1 + 1{,}4\frac{0{,}12}{0{,}582}\right] = 745$$

$$\Sigma_\mathrm{a}(\mathrm{T_0}) = \sum_i \Sigma_{\mathrm{a}_i}(293)\sqrt{\frac{293}{\mathrm{T_0}}} = 0{,}168\sqrt{\frac{293}{578}} = 0{,}12$$

Где $\mathrm{T_0}$, К - средняя температура замедлителя в расчёте «горячего» реактора эта температура принимается равной 578 К.

$\Sigma_a(T_0)_{a,i} = \sum_i \sigma_i \cdot N_i^{яч}$, 1/см — сумма макроскопических поперечных сечений поглощения нейтронов для всех компонент активной зоны, осредненных по температуре замедлителя. Её значение показано в таб. 4.4.

$\xi\Sigma_{s|1эВ} = \sum_i \xi\sigma_{s|1эВ} \cdot N_i^{яч}$, 1/см — замедляющая способность активной зоны, определяемая как сумма этих характеристик, найденных для каждой компоненты в справочных данных для энергии нейтронов, равной 1эВ. Её значение показано в таб. 4.4.

$$\mathrm{T}_{\mathrm{н.г}}^{(2)} = 720K$$
$$\mathrm{T}_{\mathrm{н.г}}^{(3)} = 697K$$

3.4.11. Определение микросечений и макросечений при Тн.г

$$\sigma_{ai}(\mathrm{T_{н.г}}) = \sigma_{ai}(293)\cdot\frac{\sqrt{\pi}}{2}\sqrt{\frac{293}{\mathrm{T_{н.г}}}} = 0{,}543\cdot\sigma_{ai}(293)$$

$$\sigma_{a,5}(\mathrm{T_{н.г}}) = \sigma_{a,5}(293)\cdot\frac{\sqrt{\pi}}{2}\sqrt{\frac{293}{\mathrm{T_{н.г}}}}\cdot g_{a,5}(\mathrm{T_{н.г}}) = 683\frac{\sqrt{\pi}}{2}\sqrt{\frac{293}{745}}\cdot 0{,}935 = 355\ (\text{барн})$$

$$\sigma_{f,5}(\mathrm{T_{н.г}}) = \sigma_{f,5}(293)\cdot\frac{\sqrt{\pi}}{2}\sqrt{\frac{293}{\mathrm{T_{н.г}}}}\cdot g_{f,5}(\mathrm{T_{н.г}}) = 582\frac{\sqrt{\pi}}{2}\sqrt{\frac{293}{745}}\cdot 0{,}935 = 302{,}4\ (\text{барн})$$

$$\sigma_{a,9}(\mathrm{T_{н.г}}) = \sigma_{a,9}(293)\cdot\frac{\sqrt{\pi}}{2}\sqrt{\frac{293}{\mathrm{T_{н.г}}}}\cdot g_{a,9}(\mathrm{T_{н.г}}) = 1028\frac{\sqrt{\pi}}{2}\sqrt{\frac{293}{745}}\cdot 2{,}15 = 1229\ (\text{барн})$$

$$\sigma_{f,9}(\mathrm{T_{н.г}}) = \sigma_{f,9}(293) \cdot \frac{\sqrt{\pi}}{2}\sqrt{\frac{293}{\mathrm{T_{н.г}}}} \cdot g_{f,9}(\mathrm{T_{н.г}}) = 742\frac{\sqrt{\pi}}{2}\sqrt{\frac{293}{745}} \cdot 2{,}15 = 887 \text{ (барн)}$$

$$\sigma_{si}(\mathrm{T_{н.г}}) = \sigma_{si}(293) \cdot \frac{\sqrt{\pi}}{2}\sqrt{\frac{293}{\mathrm{T_{н.г}}}} = 0{,}543\sigma_{si}(293)$$

$$\sigma_{tr_{H_2O}}(\mathrm{T_{н.г}}) = \sigma_{tr_{H_2O}}(293) \cdot \frac{\sqrt{\pi}}{2}\sqrt{\frac{293}{\mathrm{T_{н.г}}}} = 55\frac{\sqrt{\pi}}{2}\sqrt{\frac{293}{745}} = 29{,}9 \text{ (барн)}$$

где $g_{a5}(T_{нг})$, $g_{f5}(T_{нг})$, $g_{a9}(T_{нг})$ и $g_{f9}(T_{нг})$ – коэффициенты (g-факторы), учитывающие отклонение действительного изменения σ от закона «1/v». Учитываются для U^{235} и Pu^{239} определяются по таблицам в зависимости от величины $T_{нг}$. (приложение [2])

Результаты показаны в таблице 4.4.

Выполняется расчёт макросечения перемножением соответствующего микросечения на концентрацию компоненты в ячейке активной зоны.

$$\sum_{ji}(T_{нг}) = N_i^{яч}\sigma_{ji}(T_{нг}),$$

где индекс «i» принадлежит i-ой компоненте, а «j» указывает на вид взаимодействия нейтрона с ядром (поглощение –«a», поглощение с делением – « f», рассеяние – «s», транспорт – «tr»).

Результаты показаны в таблице 4.4.

Таб. 3.5. Микросечение и макросечение компонентов при $T_{нг}$ на конце кампании при $x_5 = 3{,}3\%$

Элемент	σ_a*10^{24} (Тн.г); $см^2$	$\sum_a$(Тн.г); $см^{-1}$	σ_s*10^{24} (E=0.025эВ); $см^2$	σ_s*10^{24} (Тн.г); $см^2$	$\sum_s$ (Тн.г); $см^{-1}$	$\sigma_{tr}*10^{24}$ (E=0.025эВ) $см^2$	$\sigma_{tr}*10^{24}$ (Тн.г); $см^2$	$\sum_{tr}$*(Тн.г); $см^{-1}$
H_2O	0,358	0,00501	110	61,1	0,855	55	30,6	0,428
U^5	355	0,0444	13,8	7,67	0,000959	15	15	0,00188
U^8	1,51	0,0101	8,9	4,95	0,0331	9	9	0,0601
O	0,000111	1,53E-06	3,76	2,09	0,0288	3,6	3,6	0,0497
He	0,00389	9,38E-10	0,76	0,422	1,02E-07	0,66	0,66	1,59E-07
Zr	0,103	0,000605	6,4	3,56	0,0209	6,14	6,14	0,036
Pu^9	1229	0,047	7,7	4,28	0,00017	9,5	9,5	0,00037
Xe^5	1,51E+06	0,00237	-	-	-	4,3	4,3	6,76E-09
Sm^9	2,27E+04	0,00102	-	-	-	-	-	-
Шлаки	27,8	0,0049	-	-	-	15	15	0,00265
		0,115			**0,939**			**0,579**

Таб. 3.6. Микросечение и макросечение компонентов при $T_{нг}$ на конце кампании при $x_5^{(2)} = 2{,}9\%$

Элемент	σ_a*10^{24} (Тн.г); $см^2$	$\sum_a$(Тн.г); $см^{-1}$	σ_s*10^{24} (E=0.025эВ); $см^2$	σ_s*10^{24} (Тн.г); $см^2$	$\sum_s$ (Тн.г); $см^{-1}$	$\sigma_{tr}*10^{24}$ (E=0.025эВ) $см^2$	$\sigma_{tr}*10^{24}$ (Тн.г); $см^2$	$\sum_{tr}$*(Тн.г); $см^{-1}$
H_2O	0,364	0,0051	110	62,2	0,871	55	31,1	0,435
U^5	361	0,0347	13,8	7,8	0,000749	15	15	0,00144
U^8	1,53	0,0102	8,9	5,03	0,0336	9	9	0,0601
O	0,000113	1,56E-06	3,76	2,13	0,0294	3,6	3,6	0,0497
He	0,00396	9,54E-10	0,76	0,43	1,04E-07	0,66	0,66	1,59E-07
Zr	0,105	0,000616	6,4	3,62	0,0212	6,14	6,14	0,036
Pu^9	1203	0,042	7,7	4,35	0,00015	9,5	9,5	0,00033
Xe^5	1,54E+06	0,00186	-	-	-	4,3	4,3	5,19E-09
Sm^9	2,31E+04	0,00085	-	-	-	-	-	-
Шлаки	28,3	0,00503	-	-	-	15	15	0,00267
		0,1			**0,956**			**0,585**

Таб. 3.7. Микросечение и макросечение компонентов при $T_{нг}$ на конце кампании при $x_5^{(3)} = 2{,}5\%$

Элемент	σ_a*10^{24} (Тн.г); $см^2$	$\sum_a$(Тн.г); $см^{-1}$	σ_s*10^{24} (E=0.025эВ); $см^2$	σ_s*10^{24} (Тн.г); $см^2$	$\sum_s$ (Тн.г); $см^{-1}$	$\sigma_{tr}*10^{24}$ (E=0.025эВ) $см^2$	$\sigma_{tr}*10^{24}$ (Тн.г); $см^2$	$\sum_{tr}$*(Тн.г); $см^{-1}$
H_2O	0,37	0,00518	110	63,2	0,885	55	31,6	0,442
U^5	367	0,0253	13,8	7,93	0,000547	15	15	0,00104
U^8	1,56	0,0104	8,9	5,11	0,0341	9	9	0,0601
O	0,000115	1,59E-06	3,76	2,16	0,0298	3,6	3,6	0,0497
He	0,00402	9,69E-10	0,76	0,437	1,05E-07	0,66	0,66	1,59E-07
Zr	0,106	0,000622	6,4	3,68	0,0216	6,14	6,14	0,036
Pu^9	1175	0,037	7,7	4,42	0,00014	9,5	9,5	0,0003
Xe^5	1,56E+06	0,00137	-	-	-	4,3	4,3	3,77E-09
Sm^9	2,34E+04	0,00069	-	-	-	-	-	-
Шлаки	28,7	0,00504	-	-	-	15	15	0,00264
		0,086			**0,971**			**0,592**

3.4.12. Расчёт квадрата длины диффузии тепловых нейтронов

$$L^2 = [3 \cdot \Sigma_a(T_{н.г}) \cdot \Sigma_s(T_{н.г})]^{-1} = [3 \cdot 0{,}115 \cdot 0{,}579]^{-1} = 5{,}01(см^2)$$

$\Sigma_a(T_{н.г}) = \sum_i^n (\sigma_{ai}(T_{н.г}))N_i^{яч}$ - макросечение поглощения активной зоны для тепловой нейтронов, определяемая как сумма макросечений поглощения всех компонент активной зоны для этих нейтронов при $T_{н.г}$ $\Sigma_a(T_{н.г}) = 0{,}115\ (см^{-1})$.

$\Sigma_{tr}(T_{н.г}) = \sum_i^n (\sigma_{tri}(T_{н.г}))N_i^{яч}$ - транспортное макросечение активной зоны для тепловой нейтронов, определяемая как сумма транспортных макросечений всех компонент активной зоны для этих нейтронов при $T_{н.г}$ $\Sigma_s(T_{н.г}) = 0{,}579(см^{-1})$.

$$L_2^2 = 5{,}7(см^2)$$

$$L_3^2 = 6{,}55(см^2)$$

3.4.13. Расчёт возраста тепловых нейтронов

$$\tau = \frac{u_{гр}}{3\xi \sum_s^{б} \sum_{tr}^{б}}$$

где $u_{гр} = \ln\left(\frac{2.10^6}{E_{гр}}\right)$ граничная летаргия, величина, определяющая завершение процесса замедления нейтронов и зависящая от величины энергии нейтронов на стыке спектров замедляющихся и тепловых нейтронов (энергии «сшивки»). Эта энергия определяется из решения трансцендентного уравнения

$$x_{гр}^2 e^{-x_{гр}} = \frac{\sum_a (T_{нг})}{\xi \sum_s^{рез}}$$

где $\xi \sum_s^{рез} = \sum_i^n (\xi \sigma_s^{рез}) N_i^{яч}$ — замедляющая способность активной зоны для резонансных нейтронов, определяемая как сумма замедляющих способностей всех компонент активной зоны для этих нейтронов $\xi\Sigma_s^{\text{рез}} = 0{,}574(\text{см}^{-1})$; при этом $E_m = kT_{нг}$, где $k = 8.61 \cdot 10^{-5}$, эВ/К – постоянная Больцмана.

Я получил уравнение

$$x_{\text{гр}}^2 \cdot e^{-x_{\text{гр}}} = \frac{0{,}115}{0{,}574} => \begin{cases} x_{\text{гр}} = -0{,}372 \\ x_{\text{гр}} = 4{,}7 \end{cases}$$

Т.к. $x_{гр}$ не может быть отрицательным, то принимаем $x_{гр} = 4{,}7$, я получил

$$\text{E}_{\text{гр}} = x_{\text{гр}} \cdot \text{E}_{\text{т}} = 4{,}7 \cdot 8{,}61 \cdot 10^{-5} \cdot 745 = 0{,}301 \text{ (эВ)}$$

$\xi \sum_s^{б} = \sum_i^n (\xi \sigma_s^{б}) N_i^{яч}$ - замедляющая способность активной зоны для быстрых нейтронов, определяемая как сумма замедляющих способностей всех компонент активной зоны для этих нейтронов $\xi\Sigma_s^{\text{б}} = 0{,}261(\text{см}^{-1})$

$\Sigma_{tr}^{б} = \sum_{i}^{n} (\sigma_{tr}^{б}) N_i^{яч}$ - транспортное макросечение активной зоны для быстрых нейтронов, определяемая как сумма транспортных макросечений всех компонент активной зоны для этих нейтронов $\Sigma_{tr}^{б} = 0{,}271(\text{см}^{-1})$

Считаем возраст тепловых нейтронов

$$\tau = \frac{ln\left(\frac{2 \cdot 10^6}{\text{E}_{\text{гр}}}\right)}{3 \cdot \xi \Sigma_s^{б} \cdot \Sigma_{tr}^{б}} = \frac{ln\left(\frac{2 \cdot 10^6}{0{,}301}\right)}{3 \cdot 0{,}261 \cdot 0{,}271} = 74\ (\text{см}^2)$$

$$\tau^{(2)} = 74(\text{см}^2)$$

$$\tau^{(3)} = 74(\text{см}^2)$$

3.4.14. Материальный параметр реактора

$$\text{B}^2 = \left(\frac{\pi}{\text{H}'}\right)^2 + \left(\frac{2{,}045}{R'}\right)^2 = \left(\frac{\pi}{400}\right)^2 + \left(\frac{2{,}045}{180}\right)^2 = 1{,}9 \cdot 10^{-4}(\text{см}^2)$$

где $H' = H_{аз} + 2\delta$ и $R' = R_{аз} + \delta$, см — экстраполированные (увеличенные на величину эффективной добавки) размеры активной зоны δ = 10 см (задано).

$$\text{B}_2^2 = 1{,}9 \cdot 10^{-4}(\text{см}^2)$$

$$\text{B}_3^2 = 1{,}9 \cdot 10^{-4}(\text{см}^2)$$

3.4.15. Расчёт коэффициент K∞

$$K_{\infty} = \eta \cdot \varepsilon \cdot \varphi \cdot \theta$$

а) Число быстрых нейтронов нового поколения, образующихся при поглощении одного теплового нейтрона в топливе (η).

$$\eta = \frac{\nu_5 \Sigma_{f5} + \nu_9 \Sigma_{f9}}{\Sigma_{a5} + \Sigma_{a9} + \Sigma_{a8} + \Sigma_{aO_2}} = \frac{2{,}42 \cdot 0{,}0378 + 2{,}92 \cdot 0{,}034}{0{,}0444 + 0{,}0101 + 1{,}53 \cdot 10^{-6} + 0{,}047} = 1{,}88$$

$$\eta^{(2)} = 1{,}83$$

$$\eta^{(3)} = 1{,}76$$

Где $\nu_5 = 2{,}42$ и $\nu_9 = 2{,}92$.

б) Коэффициент размножения на быстрых нейтронах (ε).

$$\varepsilon = \frac{1{,}34 + p\varepsilon_{бл}}{1+p} = \frac{1{,}34 + 6{,}31 \cdot 1{,}0063}{1+6{,}31} = 1{,}05$$

$$\varepsilon^{(2)} = 1{,}05$$

$$\varepsilon^{(3)} = 1{,}05$$

в). Вероятность избежать резонансного поглощения нейтронов (φ).

$$\varphi = exp\left(-\frac{N^{яч}{}_i I_i}{\zeta \sum_s^{рез}}\right)$$

где I_i , барн — т.н. «эффективный резонансный интеграл» для i-той компоненты активной зоны; $\zeta \sum^{рез}{}_s$ 1/см — замедляющая способность активной зоны для резонансных нейтронов (находится как сумма замедляющих способностей всех компонент активной зоны) $\xi\Sigma_s^{\text{рез}} = 0{,}574(\text{см}^{-1})$.

Значения эффективных резонансных интегралов для различных элементов задаются в приложении [3]. Для расчета I8 можно воспользоваться формулой Гуревича – Померанчука:

$$\mathrm{I}_8 = 4{,}9 + \frac{2{,}08 П_m}{\sqrt{\bar{l} N_8^{бл} 10^{-24}}}$$

где Пт= 0,77 + 0,0135$\sqrt{T_U}$ — температурная поправка, учитывающая «уширение» резонансных уровней (эффекта Доплера); T_U, K - средняя температура уранового блока; $\bar{l}, см$ средняя хорда, характеризующая пробег нейтрона в блоке.

$$П_T = 0{,}77 + 0{,}0135\sqrt{T_U} = 0{,}77 + 0{,}0135\sqrt{978} = 1{,}19$$

$$T_U = T_{H_2O} + 400 = 978K$$

$$\bar{l} = d_2\sqrt{n_{твэл}} = 0{,}95\sqrt{289} = 16{,}2 \text{ (см)}$$

$$I_8 = 4{,}9 + \frac{2{,}08 \cdot 1{,}19}{\sqrt{16{,}2 \cdot 6{,}68 \cdot 10^{-3}}} = 12{,}4 \text{ (барн)}$$

Вероятность избежать резонансного поглощения нейтронов:

$$\varphi = \prod_{i=1}^{6} \varphi_i = 0{,}655$$

Таб. 3.8. Значение вероятность избежать резонансного поглощения нейтронов и барн по элементам

Элемент	H_2O	U_5	U_8	O	He	Zr	Pu	Xe	Sm	Шлаки
I_8	0	271	12,4	0	0	3	1500	0	0	220
φ	1	0,943	0,866	1	1	0,97	0,904	1	1	0,935

Где коэффициента K_φ учитывает влияния нуклида Pu^{241} на величину φ.

$K_\varphi = 0{,}98$

$$\varphi^{(2)} = 0{,}671$$

$$\varphi^{(3)} = 0{,}686$$

г). Коэффициент использования тепловых нейтронов (θ).

$$\theta = \frac{\Sigma_{aT}}{\Sigma_{aT} + \Sigma_{aXe} + \Sigma_{aSm^{149}} + \Sigma_{a\text{шлак}} + 1{,}2 \cdot \Sigma_{aZr} + 1{,}56 \cdot \Sigma_{aH_2O}}$$

$$= \frac{0{,}143}{0{,}143 + 0{,}00427 + 0{,}00184 + 0{,}00882 + 1{,}2 \cdot 0{,}00109 + 1{,}56 \cdot 0{,}009}$$

$$= 0{,}825$$

$$\theta^{(2)} = 0{,}804$$

$$\theta^{(3)} = 0{,}778$$

где коэффициенты 1,2 и 1,56 учитывают неравномерность распределения нейтронного потока по сечению расчетной ячейки и получены из анализа опыта эксплуатации прототипных реакторов.

$$K_\infty = 1{,}88 \cdot 1{,}05 \cdot 0{,}655 \cdot 0{,}825 = 1{,}07$$

$$K_\infty^{(2)} = 1{,}04$$

$$K_\infty^{(2)} = 0{,}986$$

3.4.16. Эффективный коэффициент размножения нейтронов

$$K_{эф} = K_{\infty} \cdot \frac{e^{-B^2\tau}}{1 + B^2L^2} = 1{,}07 \cdot \frac{e^{-1{,}9 \cdot 10^{-4} \cdot 74}}{1 + 1{,}9 \cdot 10^{-4} \cdot 5{,}01} = 1{,}05$$

$$K_{эф}^{(2)} = 1{,}02$$

$$K_{эф}^{(3)} = 0{,}97$$

3.4.17. Запас реактивности реактора

$$\rho_{кк}^{г,отз} = \frac{K_{эф} - 1}{K_{эф}} = \frac{1{,}05 - 1}{1{,}05} = 0{,}0476 = 4{,}76\%$$

$$\rho_{кк}^{г,отз(2)} = 1{,}96\%$$

$$\rho_{кк}^{г,отз(2)} = -2\%$$

3.4.18. Определение обогащения топлива.

Требуемое обогащение топлива делящимся нуклидом U^{235} определится на этом графике как проекция на ось абсцисс точки пересечения с зависимостью $\rho(x_5)$ величины оперативного запаса реактивности ρ^{on}.

Принимаем обогащение топлива x_5 = 2,9% n x_5 = 2,5%, получаем величины запаса реактивности соответственно ρ = 1,96% и ρ = -2%.

Построим график зависимости запаса реактивности реактора от принятого обогащения.

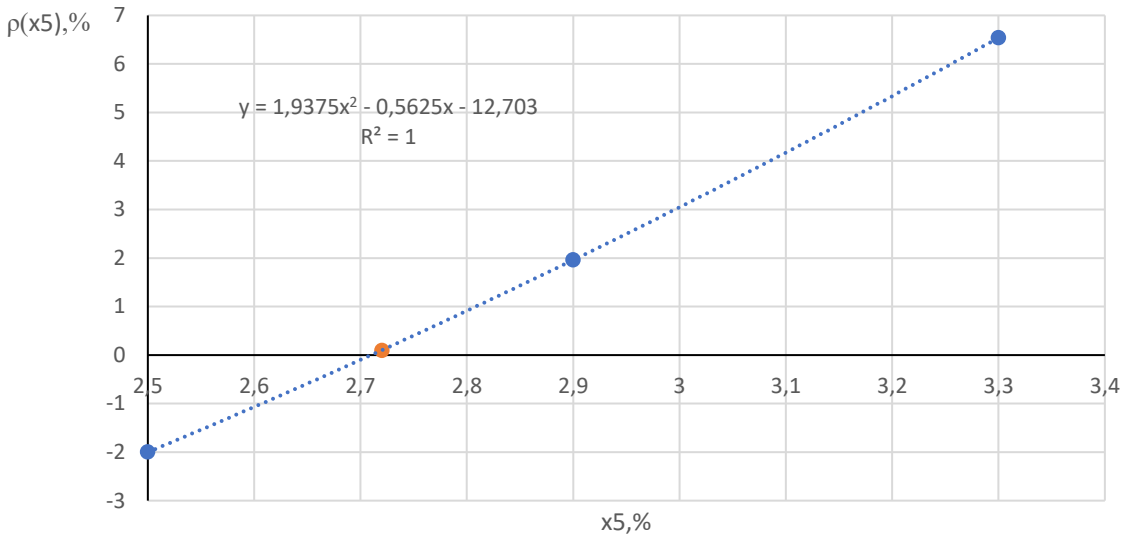

Рис. 3,2. График зависимости запаса реактивности реактора от обогащения топлива

Оперативный запас реактивности принимает $\rho^{оп} = 0,1\%$. Тогда требуемое обогащение $x_5 = 2,72\%$.

3.5. ВЫВОД ПО ГЛАВЕ 3

В результате нейтронно-физического расчета был определен что, разработанный реактор может работать на тепловых нейтронах с коэффициентом размножения $К_{эф} = 1,05$ при обогащении 3,3%. При этом значение рекомендуемого обогащения составляет 2,72%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате работы был выполнен проект АЭС мощностью 1000 МВт с реактором типа ВВЭР на тепловых нейтронах. Предлагается строительство атомной электростанции в провинции Игнеада, Турция.

В ходе работы были проведены расчет тепловой схемы и нейтронно-физический расчет ядерного реактора. В результате расчета энергоблока АЭС с реактором типа ВВЭР получены (с КПД = 33,3 %):

- Основные параметры контура рабочего тела: давление и температура генерируемого пара в горизонтальном парогенераторе: 6,5 МПа и 280ºС.
- Число регенеративных подогревателей: 4 подогревателя низкого давления и 2 подогревателя высокого давления, а также давление в отборах
- T-Q диаграмма ПГ
- Расходы в элементах схемы
- Расход питательной воды составляет 1804,6 кг/с, расход теплоносителя – 19657 кг/с.

В результате нейтронно-физического расчета был определен что, разработанный реактор может работать на тепловых нейтронах с коэффициентом размножения $К_{эф} = 1{,}05$ при обогащении 3,3%. При этом значение рекомендуемого обогащения составляет 2,72%.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

Сечения нейтронов с нуклидами некоторых веществ

Сечения нейтронов с нуклидами еккоторых веществ									
Элемент	Микросечение в тепловой области				Замедл. Способи при	Микросе-чение рассеян	Замедл. Способи в рез.	Замедл. Способи для	Микросе. транспор. для
	Поглощ-ения	Деления	Рассеян-ия	транспо-ртные					
	10^{-24}см^2	10^{-24}см^2	10^{-24}см^2	10^{-24}см^2	10^{-24}см^2	10^{-24}см^2	10^{-24}см^2	10^{-24}см^2	10^{-24}см^2
	σ_{ai}	σ_{fi}	σ_{si}	σ_{tri}	$\xi\sigma_{si}$/1эВ	$\sigma_{si}^{рез}$	$\xi\sigma_{si}^{рез}$	$\xi\sigma_{si}^{б}$	$\sigma_{tri}^{б}$
H_2O	0.664	0	110	55	41	46	40.4	18.1	9.5
Zr	0.185	0	6.4	6.14	0.135	0	0.14	0.14	6.1
U^5	683	582	13.8	15	0.126	8.2	0.09	0.05	7.8
U^8	2.71	0	8.9	9	0.075	8.2	0.07	0.06	7.7
O	2.00E-04	0	3.76	3.6	0.45	0	0.46	0.43	3.6
He	0.007	0	0.76	0.66	0	0	0	0	0
Pu^9	1028	742	7.7	9.5	0.083	0	0.08	0.07	10
Xe^5	2.72E+06	0	0	4.3	0	0	0	0	0
Sm^9	4.08E+04	0	0	0	0	0	0	0	0
Шлаки	50	0	0	15	0	0	0	0	0

Приложение 2

Факторы g(Тн.г), учитывающие отклонение сечений поглощения и деления от закона 1/v при усреднении по спектру Максвелла

$T_{н.г.}$, K	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400
^{235}U	0.973	0.957	0.945	0.938	0.935	0.935	0.934	0.933	0.0932	0.931	0.929	0.926
^{239}Pu	1.06	1.22	1.43	1.7	2	2.33	2.7	3	3.3	3.54	3.76	3.94

Приложение 3

Эффективные резонансные интегралы нуклидов некоторых веществ

Материал	^{235}U	^{239}Pu	Zr	Al	Сталь	Шлаки	H_2O	C	He	O_2
I, барн	271	1500	3	0.18	2.5	220	0	0	0	0

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Обзор энергетики страны, International Atomic Energy Agency- [Электронный ресурс],–URL: https://cnpp.iaea.org/countryprofiles/Turkey/Turkey.htm (дата обращения 21.12.2021)
2. Выбор площадок для ядерных установок [Электронный ресурс] – URL: https://kurumsalarsiv.tenmak.gov.tr/bitstream/20.500.12878/106/2/30013.pdf (дата обращения 20.12.2021).
3. Экологические характеристики провинции Игнеада [Электронный ресурс], – URL: http://www.demirkoy.gov.tr/igneada. (дата обращения 21.12.2021)
4. Расположение провинции Кыркларели [Электронный ресурс], – URL: https://tr.wikipedia.org/wiki/K%C4%B1rklareli (дата обращения 21.12.2021)
5. Расположение Игнеада в провинции Кыркларели [Электронный ресурс], – URL: https://tr.wikipedia.org/wiki/%C4%B0%C4%9Fneada (дата обращения 21.12.2021)
6. Географические и экономические особенности провинции Игнеада [Электронный ресурс], – URL: https://kirklareli.csb.gov.tr/genel-bilgiler-i-3772 . (дата обращения 21.12.2021)
7. Метрология провинции Игнеада [Электронный ресурс] – URL: https://tr.weatherspark.com/y/94412/%C4%B0%C4%9Fneada-T%C3%BCrkiye-Ortalama-Hava-Durumu-Y%C4%B1l-Boyunca (дата обращения 20.12.2021).
8. Карта опасности землетрясения в Турции [Электронный ресурс], – URL: https://deprem.afad.gov.tr/deprem-tehlike-haritasi. (дата обращения 21.12.2021)
9. Маргулова Т.Х. Атомные электрические станции. – М.: ИздАТ, 1994. – 296 с
10. Ривкин С.Л., Александров А.А. Теплофизические свойства воды и водяного пара. – М.: Энергия, 1980. – 424 с.

11. А.Г. Костюк, В.В. Фролов. Турбины тепловых и атомных станций: Учебник для вузов. – М.: Издательство МЭИ, 2001. – 488 с.

12. Расчёт тепловой схемы паротурбинной установки ТЭС и АЭС: методические указания к выполнению курсовой работы для студентов 3-го курса ИЯЭ и ТФ направлений подготовки 140100, 140700, 141403 очной формы обучения/ НГТУ; сост.: А. В. Безносов, И. В. Каратушина. Н. Новгород, 2014. - 34 с.
13. Расчет тепловых схем атомных электрических станций: методические указания к выполнению курсовой работы для студентов специальности 14.02.01 «атомные электрические станции и установки»/ ИГЭУ им. В. И. Ленина; сост.:М.Н. Мечтаева, ред. Дубова Л.В. г. Иваново, 2018. – 33 с.
14. А.А. Калютик, М.Н. Конович, В.Н. Митюков - Методика нейтронно-физического расчета ВВЭР, М.: Издательство Санкт-Петербургский государственный политехнический университет Петра Великого, 2018. - 47 с
15. Нейтронно- расчет реактора типа ВВЭР: Направление подготовки 14.03.02 «Ядерные физика и технологии»/ТПУ/ Овсенев А.Е., г. Томск 2017 132с
16. Г.А. Бать. Основы теории и методы расчета ядерных энергетических реакторов. М.: Издательство Книга по Требованию, 2012.- 512 с.
17. Б.А. Дементьев. Ядерные энергетические реакторы. М.: Издательство Учебник для вузов, 1990. -352 с.