

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ

**Национальный Исследовательский Ядерный Университет
«МИФИ»**

Институт Ядерной Физики и Технологий

Кафедра Теплофизики

**ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА К ВЫПУСКНОЙ
КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ НА ТЕМУ:**

**«Исследование режимов работы реактора ВВЭР-1000
с помощью программного комплекса „ТРЕТОН“»**

Панин Максим Денисович

Студент:

Маслов Юрий

Руководитель ВКР:

Александрович

Консультант
со стороны 5 кафедры:

Волков Юрий Николаевич

Рецензент ВКР

Федулов Михаил
Васильевич

Зав. кафедрой

Рачков Валерий Иванович

Москва
2022

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит 61 - страниц, 55 - рисунков, 11 - таблиц и 9 -источников.

РЕАКТОР ВВЭР-1000, АКТИВНАЯ ЗОНА, ГИДРОДИНАМИКА, ТЕПЛО-ОБМЕН, ОТКЛЮЧЕНИЕ ГЦН, ПОВЫШЕНИЕ МОЩНОСТИ, МОДЕЛИРОВАНИЕ, ПРОГРАММНЫЙ МОДУЛЬ ТРЕТОН

В работе выполнено моделирование теплогидравлических параметров активной зоны ВВЭР-1000 в номинальном режиме, а так же в не номинальных режимах с увеличением мощности реактора, и с отключением одного из четырех и двух их четырех ГЦН.

1. В первой главе приведен обзор конструкции и предоставлена общая информация реакторной установки ВВЭР-1000
2. Во второй главе осуществлен теплофизический расчет реактора ВВЭР-1000 в номинальном режиме
3. В третий главе осуществлен теплофизический расчет ВВЭР-1000 на программном модуле ТРЕТОН в номинальном режиме, а так же сравнения данных с аналитическим расчетом, осуществлен расчет в неноминальных режимах с увеличением мощности на 105%, 110%, 115% и отключением одного и двух стоящих друг на против друга ГЦН.

Содержание

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ И СОКРАЩЕНИЙ	5
ВВЕДЕНИЕ	6
1. Описание конструкции реактора	8
2. Теплофизический расчет	11
2.1. Постановка задачи	11
2.2. Исходные данные для проведения расчетов	11
2.3. Выбор турбины	12
2.4. Расчет КПД термодинамического цикла	14
2.5. Расчет изменения теплового потока в наиболее нагруженном канале	16
2.6. Расчет распределения температуры теплоносителя по высоте . .	16
2.7. Расчет распределения температуры внешней стенки оболочки по высоте	17
2.8. Расчет температуры топлива	21
2.9. Определение перепадов давления и необходимой мощности насосов на прокачку	22
2.10. Выводы из теплофизического расчета	24
3. Нейтронно-физический расчет	25
3.1. Постановка задачи	25
3.2. Описание инструмента ячеичного расчета	25
3.3. Модель ячейки	25
3.4. Расчет ячеек без выгорания	26
3.5. Расчет полиячеек без выгорания	27
3.6. Расчет длительности цикла и выгорания при частичных перегрузках	27
4. Исследование полей температур и теплогидравлических параметров при нестандартных режимах работы реактора	29
4.1. Постановка задачи	29
4.2. Описание расчетного инструмента	29
4.3. Расчет теплогидравлических характеристик при работе на nominalной мощности	29
4.4. Расчет теплогидравлических характеристик при работе на повышенной мощности	41

4.5. Расчет теплогидравлических характеристик при отключении одного ГЦН	47
4.6. Расчет теплогидравлических характеристик при отключении двух ГЦН	54
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	60
Перечень использованных источников	62

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ И СОКРАЩЕНИЙ

ГЦН — главный циркуляционный насос
РУ — реакторная установка
АЭС — атомная энергетическая станция
КИП — контрольно-измерительные приборы
ТВС — тепловыделяющая сборка
СВП — стержни выгорающего поглотителя
СУЗ — стержни управления защитой
АЗ — активная зона
БЗТ — блок защитных труб
ЯЭУ — ядерная энергетическая установка
КПД — коэффициент полезного действия

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в атомной промышленности большое распространение имеют водо-водяные корпусные реакторы, как кипящие (американские PWR), так и некипящие (русские ВВЭР). Благодаря использованию воды в качестве теплоносителя и замедлителя такие установки относительно дешевые в эксплуатации и достаточно безопасные ввиду возможности обеспечения отрицательного коэффициента реактивности. Отдельно стоит отметить установку ВВЭР-1000, имеющую наибольшее распространение среди реакторов такой серии (37 действующих установок из 60-и ВВЭР). Проект хорошо себя зарекомендовал и находится в эксплуатации с 1980 года, когда был установлен первый реактор такого типа на пятом энергоблоке Нововоронежской АЭС, новые установки данной модели производятся по сей день. При строительстве первых реакторов ВВЭР-1000 проектом закладывался срок эксплуатации в 30 лет, сейчас же учитывая современные научные знания срок службы таких установок и идентичных новых был увеличен до 60 лет. При столь длинных сроках эксплуатации, на которые рассчитаны РУ ВВЭР-1000 возникает потребность адаптировать существующие к современным энергетическим потребностям.

Проектом такие РУ изначально рассчитывались на большую мощность, что позволяет по необходимости эффективнее утилизировать мощностные ресурсы установки, благодаря чему можно сэкономить на строительстве новых энергоблоков. Так, например, на балаковской АЭС для ВВЭР-1000 серийного проекта В-320 успешно было проведено мероприятие по повышению мощности на 4% [1].

Таким образом проблема вертикального масштабирования по мощности наиболее актуальна для реакторов типа ВВЭР-1000, что определяет и актуальность данной работы.

Целью данной работы являлось расчет и исследования температурных полей реакторной установки ВВЭР-1000 при работе на повышенной мощности, а также на пониженной при отключении одного из четырех и двух из четырех ГЦН. Практическая значимость данной работы состоит в определении максимальных температур и выводов о работоспособности РУ в исследуемых режимах работы. На основе поставленной цели были сформированы следующие задачи:

- Произвести теплофизический и нейтронно-физический расчет ВВЭР-1000 и определить характеристики РУ в номинальном режиме работы
- Ознакомится с расчетной моделью программного комплекса ТРЕТОН и прозвести валидационный расчет РУ в номинальном режиме.
- Произвести расчетное исследование работы реактора в режиме повышенной мощности, определить максимальные температуры и их превышения и сделать вывод о возможности работы реактора в таком режиме

- Произвести расчетное исследование работы реактора при отключении одного из трех и двух из трех, произвести анализ температурных полей и сделать вывод о возможности работы РУ при пониженной мощности

1. Описание конструкции реактора

ВВЭР-1000 конструктивно относится к классу гетерогенных корпусных реакторов. С точки зрения спектра нейтронов он является тепловым. В качестве теплоносителя и замедлителя используется легкая вода под давлением. В качестве топлива в реакторе используется низкообогащенным диоксид урана UO_2 . Общий вид реактора в сборке представлен на рисунке 1.2.

В верхней части реактора расположена герметично закрытая крышка с установленными на ней приводами механизмов и органов регулирования и защиты. Также крышка оснащена патрубками для вывода кабелей датчиков внутриреакторного контроля. Крепление к корпусу осуществляется с помощью шпилек.

Корпус представляет собой вертикальный герметичный сосуд цилиндрической формы с эллиптическими днищем и крышкой с наружным диаметром 4535 мм, высотой 10.897 м и толщиной 192 мм в цилиндрической части и 210 мм в районе патрубков [2]. В качестве основного материала используется сталь сталь 15Х2НМФА. е. Вся внутренняя поверхность корпуса покрыта антикоррозионной наплавкой из нержавеющей стали толщиной не менее 8 мм. В местах соприкосновения корпуса с крышкой, шахтой, уплотнительными прокладками, в местах приварки кронштейнов, деталей крепления трубок КИП, на поверхности разделительного кольца выполнена наплавка толщиной не менее 15 мм. Внутрь реактора также устанавливается шахта, которая представляет собой цилиндрическую обечайку с фланцем и эллиптическим днищем, в котором закреплены 163 опорные трубы (стаканы) с шагом 236 мм, верхние части которых образуют опорную плиту для установки и дистанционирования кассет активной зоны.

Сверху головки ТВС прижимаются решеткой блока защитных труб, в которых имеются дистанционирующие элементы, определяющие правильное положение, рабочих ТВС. Общее количество ТВС в активной зоне ВВЭР-1000 163 шт. Все ТВС устанавливаются в реактор, и извлекаются из него как вместе с регулирующими стержнями и пучками СВП, так и без них. Головка, хвостовик, опорные и дистанционирующие решетки ТВС изготовлены из нержавеющей стали, направляющие каналы выполнены из циркониевого сплава.

ТВС в исследуемой установке является бесчехловой. Бесчехловые ТВС позволяют улучшить перемешивание теплоносителя в активной зоне, уменьшить зазор между соседними ТВС, снизить неравномерность энерговыделения за счет плотной упаковки твэлов, уменьшить гидравлическое сопротивление ТВС, повысить надежность охлаждения в аварийных режимах, связанных с течью теплоносителя за счет поперечной расточки воды из системы аварийного охлаждения, увеличить количество регулируемых стержней на одну ТВС с целью повышения прочностных свойств силового каркаса сборки и снижения количества приводов СУЗ, снизить количество дорогостоящего материала (циркония), применяемого в ТВС. Также при использовании бесчехловых ТВС в качестве расчетной модели можно использовать приближение анизотропного пористого тела для трехмерного описания АЗ, которая реализована в программном ком-

плексе ТРЕТОН.

Реактор имеет двухконтурную систему. Энергия, выделяющаяся в результате ценой реакции деления ядер урана, преобразуется в тепловую энергию теплоносителя первого контура. Далее нагретый теплоноситель поступает с помощью тепловых насосов в парогенераторы, где происходит отдача тепла воде второго контура. Образовавшийся в парогенераторах пар далее поступает в паротурбинную установку, приводящую в движение турбогенератор, который вырабатывает электроэнергию. После передачи энергии в парогенераторах вода первого контура поступает в реактор через нижний ряд напорных патрубков. Сплошная кольцевая перегородка между рядами нижних и верхних патрубков, дистанцирующая корпус реактора и его шахту, формирует движение потока теплоносителя вниз. Поэтому вода проходит вниз по кольцевому зазору между корпусом и внутренним корпусом шахты, затем через перфорированное эллиптическое днище и опорные трубы шахты входит в топливные тепловыделяющие сборки. Из ТВС через перфорированную нижнюю плиту блока защитных труб (БЗТ) теплоноситель выходит в межтрубное пространство БЗТ, а затем через кольцевой зазор между шахтой и корпусом и четыре верхних выходных патрубка из реактора.

Устройство твэла Твэл ядерного реактора ВВЭР-1000 представляет собой трубку, заполненную таблетками из двуокиси урана UO_2 и герметично уплотненную концевыми деталями на сварке. Трубка твэла изготовлена из циркония, легированного 1 % ниобия. Наружный диаметр трубы твэла 9.1 ± 0.05 мм, ее толщина 0.65 ± 0.03 мм, а внутренний диаметр 7.72 ± 0.08 мм. В эту трубку с зазором 0.19–0.32 мм на диаметр помещены таблетки двуокиси урана высотой (длиной) 20 мм и диаметром 7.57 ± 0.04 мм. В середине этих таблеток имеются отверстия диаметром 1.5 мм, а края таблеток скруглены фасками. Общая длина столба этих таблеток в твэле составляет 3530 мм. Все размеры указаны для холодного состояния. Длина трубы твэла составляет 3800 мм, поэтому положение столба топливных таблеток в твэле зафиксировано разрезными втулками из нержавеющей стали и пружиной, не препятствующими тепловым перемещениям. Вид твэла приведён на рис. 1.1 [3]

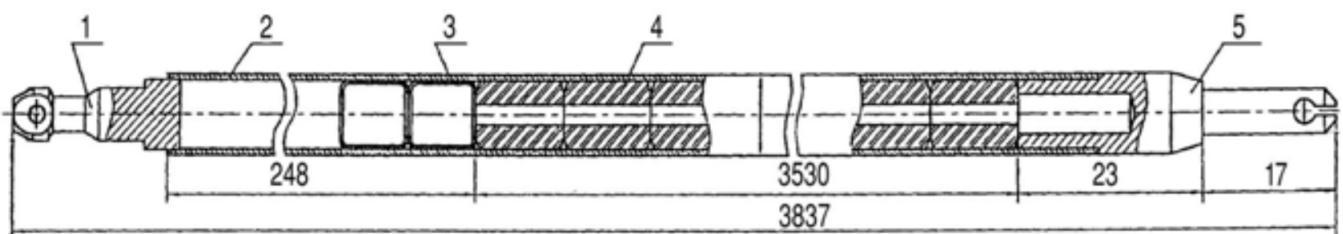
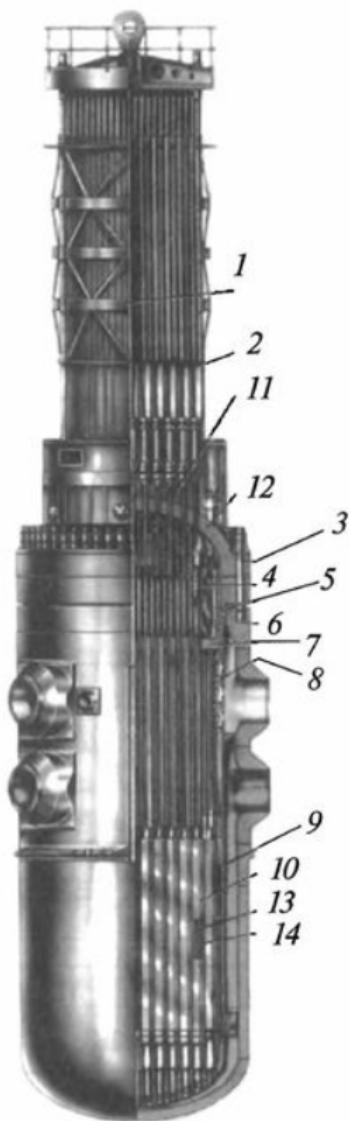


Рисунок 1.1. Тепловыделяющий элемент: 1 – заглушка верхняя; 2 – оболочка; 3 – фиксатор; 4 – таблетка; 5 – заглушка нижня

Преимущество циркония заключается в удачном сочетании ядерных и физических характеристик с механическими и коррозионными свойствами. Цирконий коррозионно стоек в большинстве сред, применяемых в качестве теплоносителей ядерных реакторов, и достаточно технологичен.

Естественная радиоактивность одной свежей ТВС составляет $1.8 \cdot 10^{10}$ Бк., гамма- излучение на поверхности около 0.2 бэр/ч.

[2]



1. верхний блок;
2. привод СУЗ;
3. шпилька;
4. труба для загрузки образцов-свидетелей;
5. уплотнение;
6. корпус реактора;
7. блок защитных труб;
8. шахта;
9. выгородка активной зоны;
10. топливные сборки;
11. теплоизоляция реактора;
12. крышка реактора;
13. регулирующие стержни;
14. топливные стержни.

Рисунок 1.2. Общий вид реактора ВВЭР-1000 в сборе

2. Термофизический расчет

2.1. Постановка задачи

В данном разделе будут определены основные термодинамические и гидравлические параметры реакторной установки. Термофизический расчет подразумевает следующий ряд задач:

1. Выбор турбины и разработка принципиальной теплосиловой схемы установки;
2. Рассчет КПД проектируемой установки;
3. Рассчет основных теплофизических характеристик, таких как мощность ТВС и твэла, расход и скорость теплоносителя, коэффициент теплоотдачи;
4. Построение распределения температур теплоносителя, оболочки и топлива по длине для наиболее напряжённого канала;
5. Определение максимально возможных температур теплоносителя, оболочки и топлива;
6. Рассчёт перепадов давлений и мощности, необходимой на прокачку теплоносителя;
7. Рассчёт коэффициента запаса до кризиса теплообмена;

2.2. Исходные данные для проведения расчетов

Для проведения теплогидравлического расчета реакторной установки использовались следующие характеристики, представленные в Таблице 2.1.

Таблица 2.1: Исходные данные для проектируемого РУ ВВЭР-1000

Характеристика	Значение
Электрическая мощность реактора, МВт	1000
Температура теплоносителя на входе в АЗ $T_{\text{вх}}$, $^{\circ}\text{C}$	287
Температура теплоносителя на выходе АЗ $T_{\text{вых}}$, $^{\circ}\text{C}$	320
Температура питательной воды, $^{\circ}\text{C}$	220
Температура свежего пара, $^{\circ}\text{C}$	274.6
Давление свежего пара	5.9
Температура пара после пароперегревателей, $^{\circ}\text{C}$	250
Давление в АЗ, МПа	15.7
Степень сухости пара после ЦВД и ЦНД, %	80
Количество петель РУ	4
Число ТВС $N_{\text{ТВС}}$, шт	163
Число твэл в ТВС $N_{\text{твэл}}$, шт	317
Коэффициент неравномерности по высоте АЗ	1.5
Коэффициент неравномерности по радиусу АЗ	1.25
Высота АЗ $H_{\text{АЗ}}$, м	3.5
Диаметр твэл $d_{\text{тв}}$, мм	9.1
Размер ТВС «под ключ» a , мм	234
Диаметр центрального канала в ТВС $D_{\text{ц.к.}}$, мм	10.3
Число направляющих каналов в ТВС $N_{\text{н.к.}}$, шт	12
Шаг решетки ТВС S_m , мм	12,75
Диаметр направляющего канала в ТВС $D_{\text{н.к.}}$, мм	12.6
Толщина оболочки твэл $\delta_{\text{твэл}}$, мм	0.65
Толщина газового зазора в твэл δ_g , мм	0.135
Диаметр топливной таблетки $d_{\text{топ}}$, мм.	7.53
Диаметр отверстия топливной таблетки $d_{\text{отв}}$, мм	1.3

2.3. Выбор турбины

В качестве турбины в расчетах будем использовать модель К-1000-60/1500-2. Её характеристики представлены в таблице 2.2

[4]

Таблица 2.2: Параметры турбины К-1000-60/1500-2

Параметр	Значение или Название
Прототип турбины	К-1000-60/1500
Температура питательной воды, $^{\circ}C$	220
Температура свежего пара, $^{\circ}C$	274.6
Давление свежего пара, $^{\circ}C$	5.9
Температура после промежуточного перегрева, $^{\circ}C$	250
Количество регенеративных подогревателей	7

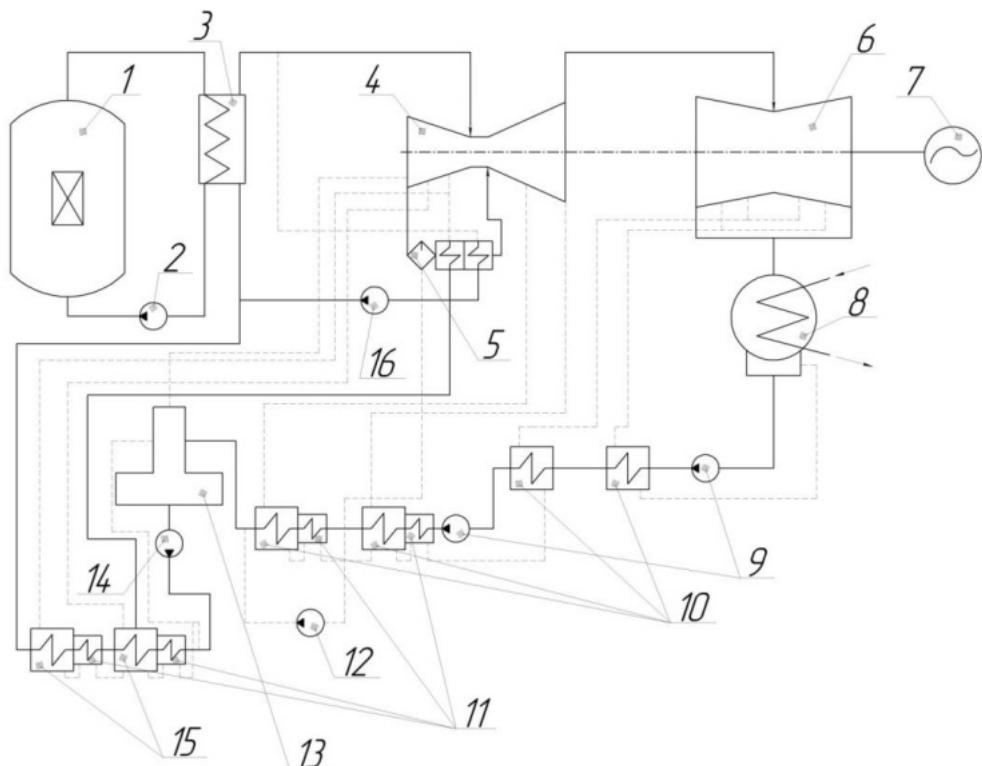


Рисунок 2.1. Тепловая схема АЭС: 1 – ядерный реактор, 2 – главный циркуляционный насос, 3 – парогенератор, 4 – цилиндр высокого давления, 5 – сепаратор-пароперегреватель, 6 – цилинды низкого давления, 7 – генератор, 8 – конденсатор, 9 – конденсационный электронасос, 10 – подогреватель низкого давления, 11 – охладитель, 12 – станция насосная, 13 – деаэратор, 14 – плунжерный электронасос, 15 – подогреватель высокого давления, 16 – конденсационный насос с гидротурбинным приводом

2.4. Расчет КПД термодинамического цикла

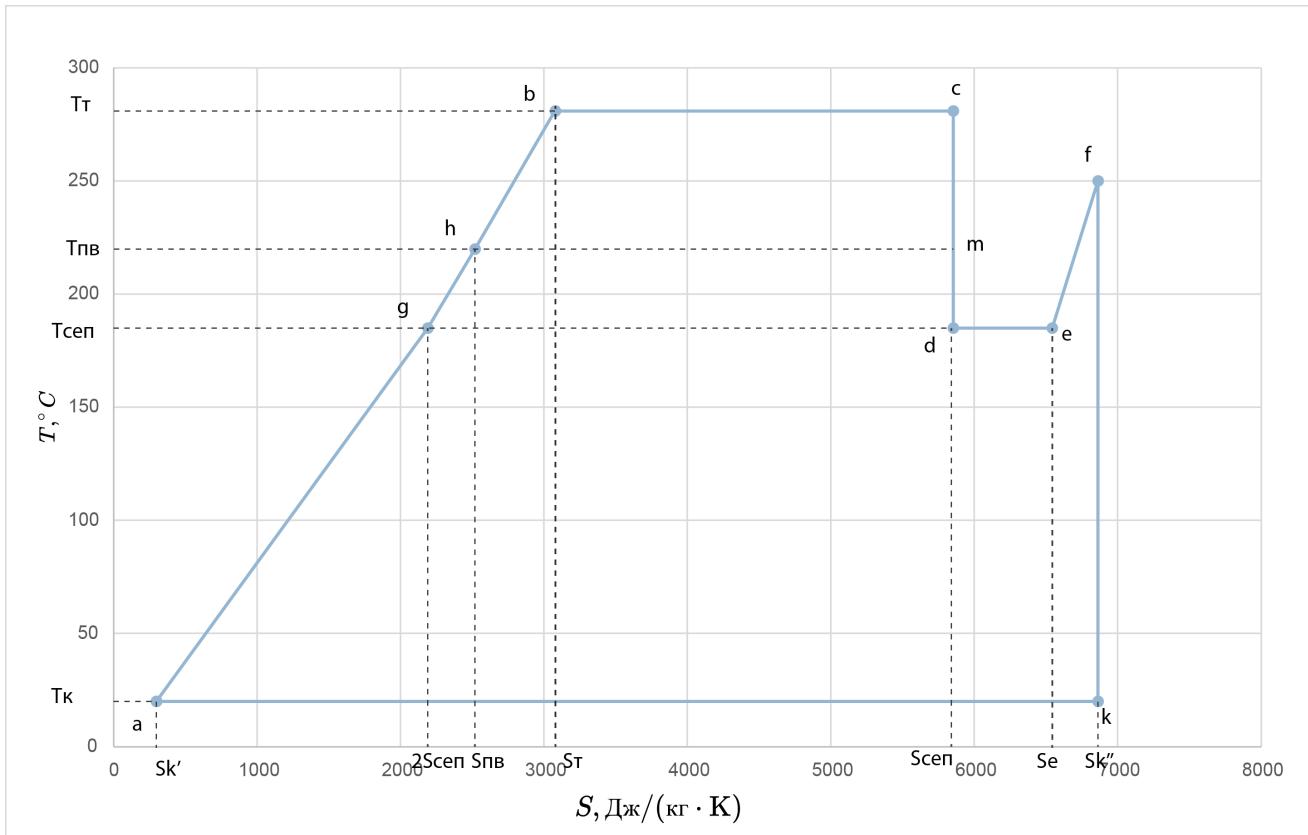


Рисунок 2.2. TS диаграмма турбинного цикла в реакторе ВВЭР-1000 : hbc — нагрев и испарение в парогенераторе; cd — расширение пара в ЦВД; de — пар отделяется от конденсата в сепараторе; ef — пар поступает в промежуточный пароперегреватель; fk — расширение пара в ЦНД; ka — конденсация в конденсаторе; ag — регенеративный подогрев в ПНД; gh — регенеративный подогрев в ПВД;

Таблица 2.3: Значения параметров TS-диаграммы

Точка	P, МПа	T, °C	S, Дж/(кг · K)	h, кДж/кг
h	5.9	220	2516.4	942.9
b	5.9	274.6	3017.4	1208.1
c	5.9	274.6	5898.01	2785.6
d	0.98	179.189	5898.01	2462.7
e	0.98	179.189	6591.7	2776.4
f	0.98	250	6936.1	2943.61
k	0.004	28.7	6936.1	2099.5
k'	0.004	28.7	416.66	119.656
a	5.9	28.7	414.9	125.1
g	0.98	179.2	2130.2	758.9

Произведём расчет КПД для турбины К-1000-60/1500. Термический КПД без регенерации [5]:

$$\eta_{t0} = 1 - \frac{T_k \cdot (s_f - s_a) \cdot x_d}{(h_c - h_g) + x_d ((h_g - h_a) + (h_f - h_e))} \quad (1)$$

$$\eta_{t0} = 1 - \frac{3.017 \cdot 10^2 \cdot (6.936 \cdot 10^3 - 4.149 \cdot 10^2) \cdot 8.445 \cdot 10^{-01}}{(2.786 \cdot 10^6 - 7.589 \cdot 10^5) + 8.445 \cdot 10^{-01} ((7.589 \cdot 10^5 - 1.250 \cdot 10^5) + (2.944 \cdot 10^6 - 2.776 \cdot 10^6))} \quad (2)$$

$$\eta_{t0} = 3.854 \cdot 10^{-01} \quad (3)$$

Термический КПД с идеальной регенерацией:

$$\eta_{t\infty} = 1 - \frac{T_k \cdot (s_f - s_g) (s_c - s_h)}{(h_c - h_h) \cdot (s_e - s_g) + (h_f - h_e) \cdot (s_c - s_h)} \eta_{t\infty} = 1 - \frac{3.017 \cdot 10^2 \cdot (6.936 \cdot 10^3 - 2.130 \cdot 10^3) (5.898 \cdot 10^3 - 2.516 \cdot 10^3)}{(2.786 \cdot 10^6) - 9.429 \cdot 10^5 \cdot (6.592 \cdot 10^3 - 2.130 \cdot 10^3) + (2.944 \cdot 10^6 - 2.776 \cdot 10^6) \cdot (5.898 \cdot 10^3 - 2.516 \cdot 10^3)} \quad (4)$$

$$\eta_{t\infty} = 4.420 \cdot 10^{-01} \quad (5)$$

Термический КПД с $n = 7$ регенеративными отборами:

$$\eta_{tn} = \eta_{t0} + (\eta_{t\infty} - \eta_{t0}) \cdot \frac{n}{n+1} = 3.854 \cdot 10^{-01} + (4.420 \cdot 10^{-01} - 3.854 \cdot 10^{-01}) \cdot \frac{7}{8} = 4.349 \cdot 10^{-01} \quad (6)$$

Учитываем: $\eta^{\text{вн}} = 0.85$ — внутренний КПД турбины; $\eta_{\text{ос}} = 0.98$ — коэффициент использования тепла, учитывающий; потери тепла в окружающую среду в прочем энергооборудовании; $\eta_{\text{эг}} = 0.98$ — КПД электрогенератора; $\eta_{\text{мех}} = 0.97$ — КПД механический, Вычисляем КПД брутто АЭС как:

$$\eta_{\text{брутто}} = \eta^7 \cdot \eta^{\text{вн}} \cdot \eta_{\text{ос}} \cdot \eta_{\text{эг}} \cdot \eta_{\text{мех}} = 0.335 = 4.349 \cdot 10^{-01} \cdot 0.85 \cdot 0.98 \cdot 0.98 \cdot 0.97 = 3.444 \cdot 10^{-01}$$

Тепловая мощность реактора при номинальной электрической мощности $Q_{\text{эл}} = 1000 \text{ МВт}$ равна:

$$Q_{\text{теп}} = \frac{Q_{\text{эл}}}{\eta_{\text{брутто}}} = \frac{1.000 \cdot 10^9}{3.444 \cdot 10^{-01}} = 2.904 \cdot 10^3 \text{ МВт}$$

2.5. Расчет изменения теплового потока в наиболее нагруженном канале

из условия

$$K_z = \frac{\pi H_{\text{аз}}}{2H_{\text{эф}} \sin \left(\frac{\pi H_{\text{аз}}}{2H_{\text{эф}}} \right)} = 1.5$$

находим эффективную добавку к высоте активной зоны. эффективная высота активной зоны будет равна $h_{\text{эф}} = 3.715 \text{ м}$. максимальная величина теплового потока на один ТВЭЛ:

$$q_{\text{max}} = \frac{Q_{\text{теп}} K_r K_z}{N_{\text{TBC}} N_{\text{твэл}} H_{\text{аз}}} = \frac{2.904 \cdot 10^9 \cdot 1.25 \cdot 1.5}{163 \cdot 317 \cdot 3.5} = 3.010 \cdot 10^2 \frac{\text{Вт}}{\text{см}} \quad (7)$$

Зависимость величины теплового потока от высоты:

$$q(z) = q_{\text{max}} \cos \left(\frac{\pi \cdot z}{H_{\text{эф}}} \right) = 3.010 \cdot 10^2 \cos \left(\frac{\pi \cdot z}{3.715} \right) \left[\frac{\text{Вт}}{\text{см}} \right]$$

2.6. Расчет распределения температуры теплоносителя по высоте

Энтальпия входа $h_{\text{вх}} = 1.268 \cdot 10^6$.

Энтальпия выхода $h_{\text{вых}} = 1.452 \cdot 10^6$.

Расход теплоносителя через ТВС:

$$G_{\text{TBC}} = \frac{Q_{\text{теп}}}{(h_{\text{вых}} - h_{\text{вх}}) N_{\text{TBC}}} = \frac{2.904 \cdot 10^9}{(1.452 \cdot 10^6 - 1.268 \cdot 10^6) \cdot 163} = 9.685 \cdot 10^1 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

Расход теплоносителя через реактор:

$$G_{\text{peak}} = \frac{Q_{\text{теп}}}{(h_{\text{вых}} - h_{\text{вх}})} = \frac{2.904 \cdot 10^9}{(1.452 \cdot 10^6 - 1.268 \cdot 10^6)} = 1.579 \cdot 10^4 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

Средняя теплоемкость воды:

$$C_p = \frac{h_{\text{вых}} - h_{\text{вх}}}{T_{\text{вых}} - T_{\text{вх}}} = C_p = \frac{1.452 \cdot 10^6 - 1.268 \cdot 10^6}{5.930 \cdot 10^2 - 5.600 \cdot 10^2} = 5.574 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

Распределение температуры теплоносителя по высоте реактора:

$$T(z) = T_{\text{вх}} + \frac{N_{\text{ТВС}} N_{\text{ТВЭЛ}} q_{\max} H_{\text{эф}}}{G_{\text{peak}} C_p \pi} \left[\sin \left(\frac{\pi z}{H_{\text{эф}}} \right) + \sin \left(\frac{\pi H_{\text{АЗ}}}{2 H_{\text{эф}}} \right) \right]$$

Отсюда максимальная температура жидкости $T_{\text{TH}}^{\max} = 328.54^{\circ}\text{C}$. График изменения температуры теплоносителя по высоте представлен на [2.3](#)

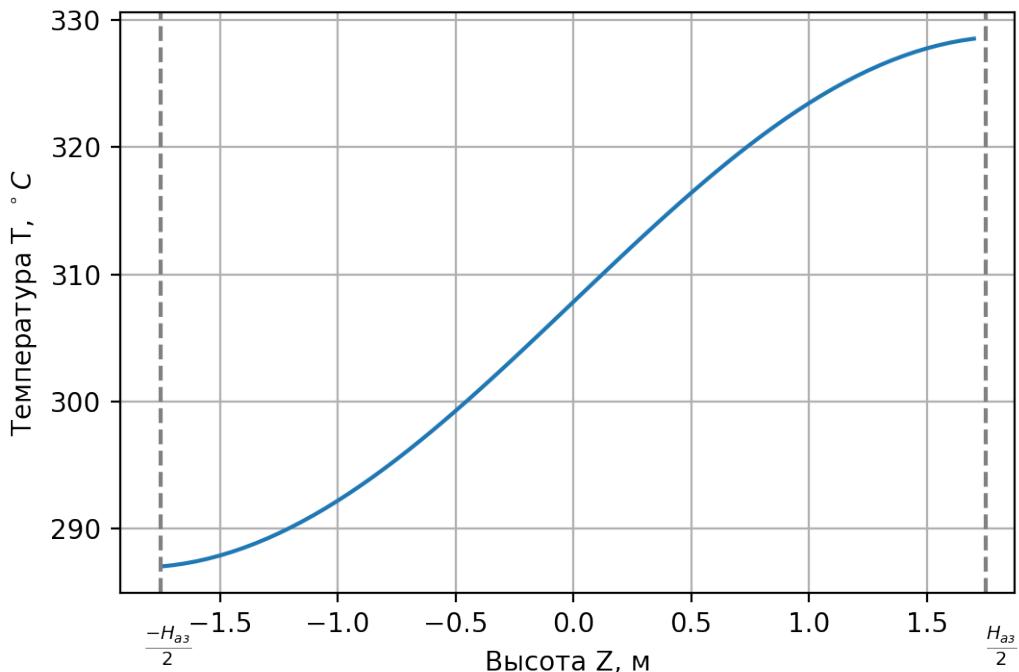


Рисунок 2.3. Изменение температуры теплоносителя по высоте

Максимальная температура теплоносителя определяется из температуры кипения теплоносителя при давлении в активной зоне. Температура насыщения воды при давлении 15.7 МПа — 345.8°C . Отсюда следует что запас до кипения $\approx 17.26^{\circ}\text{C}$.

2.7. Расчет распределения температуры внешней стенки оболочки по высоте

Площадь проходного сечения:

$$S_{\text{прох}} = \sqrt{3}/2a^2 - N_{\text{твэл}} \frac{\pi d_{\text{тв}}^2}{4} - N_{\text{н.к.}} \frac{\pi D_{\text{н.к.}}^2}{4} - \frac{D_{\text{н.к.}}^2 \pi}{4} \quad (8)$$

$$S_{\text{прок}} = \sqrt{3}/2(2.340 \cdot 10^{-01} - 2 \cdot 0.0015)^2 - 3.170 \cdot 10^2 \frac{\pi(9.100 \cdot 10^{-03})^2}{4} - 1.200 \cdot 10^1 \frac{\pi(1.260 \cdot 10^{-02})^2}{4} - \frac{(1.030 \cdot 10^{-02})^2 \pi}{4} \quad (9)$$

$$S_{\text{прок}} = 2.402 \cdot 10^4 \text{мм}^2 \quad (10)$$

Периметр:

$$\Pi = (2a\sqrt{3}) - N_{\text{твэл}} \pi d_{\text{тв}} + N_{\text{н.к}} \pi D_{\text{н.к}} + \pi D_{\text{ц.к}} \quad (11)$$

$$\Pi = (2(2.340 \cdot 10^{-01} - 2 \cdot 1.500 \cdot 10^{-03}) \cdot \sqrt{3}) - 3.170 \cdot 10^2 \cdot \pi \cdot 9.100 \cdot 10^{-03} + 1.200 \cdot 10^1 \cdot \pi \cdot 1.260 \cdot 10^{-02} + \pi \cdot 1.030 \cdot 10^{-02} \quad (12)$$

$$\Pi = 1.037 \cdot 10^4 \text{мм} \quad (13)$$

Гидравлический диаметр:

$$d_{\Gamma} = \frac{4S_{\text{прок}}}{\Pi} = \frac{4 \cdot 2.402 \cdot 10^{-02}}{1.037 \cdot 10^1} = 9.263 \cdot 10^{-03} \text{мм}$$

Определим коэффициент теплоотдачи в режиме турбулентного стационарного течения несжимаемой жидкости. Параметры теплоносителя при усредненной температуре $\bar{T} = 303.5^\circ\text{C}$:

- Динамическая вязкость $\mu = 8.721 \cdot 10^{-5} \text{Па} \cdot \text{с}$
- Коэффициент теплопроводности $\lambda = 0.5536 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$
- Число Прандтля $Pr = 0.8729$

По формуле Б.С.Петухова, В.В. Кириллова (круглые трубы) [6]:

Число Рейнольдса:

$$Re = \frac{G_{\text{peak}} \cdot d_r}{N_{\text{твс}} \cdot S_{\text{прок}} \cdot \mu} = 4.283 \cdot 10^5$$

Коэффициент гидравлического сопротивления:

$$\xi_{\text{тр}} = (1,82 \cdot \log(Re) - 1.64)^{-2} = 1.35 \cdot 10^{-02}$$

Расчитываем число Нуссельта:

$$\begin{aligned} Nu &= \frac{\frac{\xi}{8} \cdot Re \cdot Pr}{k + 12.7 \cdot \left(Pr^{\frac{2}{3}} - 1\right) \cdot \sqrt{\frac{\xi}{8}}} = \\ &= \frac{\frac{1.349 \cdot 10^{-02}}{8} \cdot 4.283 \cdot 10^5 \cdot 8.729 \cdot 10^{-01}}{1 + \frac{900}{4.283 \cdot 10^5} + 12.7 \cdot \left((8.729 \cdot 10^{-01})^{\frac{2}{3}} - 1\right) \cdot \sqrt{\frac{1.349 \cdot 10^{-02}}{8}}} = 6.589 \cdot 10^2 \end{aligned}$$

, где $k = 1 + \frac{900}{Re}$

Коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha_1 = \frac{Nu \cdot \lambda}{d_r} = \frac{6.589 \cdot 10^2 \cdot 5.536 \cdot 10^{-01}}{9.263 \cdot 10^{-03}} = 3.938 \cdot 10^4 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

По формуле Диттуса-Болтера [7]:

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} = 697.5$$

Коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha_2 = \frac{Nu \cdot \lambda}{d_r} = \frac{6.975 \cdot 10^2 \cdot 5.536 \cdot 10^{-01}}{9.263 \cdot 10^{-03}} = 4.169 \cdot 10^4 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

По формула М.А. Михеева [8]:

$$Nu = 0.021 Re^{0.8} Pr^{0.43} = 634.28$$

Коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha_3 = \frac{Nu \cdot \lambda}{d_r} = \frac{6.343 \cdot 10^2 \cdot 5.536 \cdot 10^{-01}}{9.263 \cdot 10^{-03}} = 3.791 \cdot 10^4 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

Усредним коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha = \frac{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3}{3} = 3.966 \cdot 10^4 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

Распределение температуры внешней стенки твэла по высоте реактора:

$$T_{об}(z) = T_{тн}(z) + \frac{q_{\max} \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot z}{H_{\phi}}\right)}{\pi d_{тв} \alpha}$$

Распределение температуры внешней стенки твэла по высоте реактора представлено на 2.4

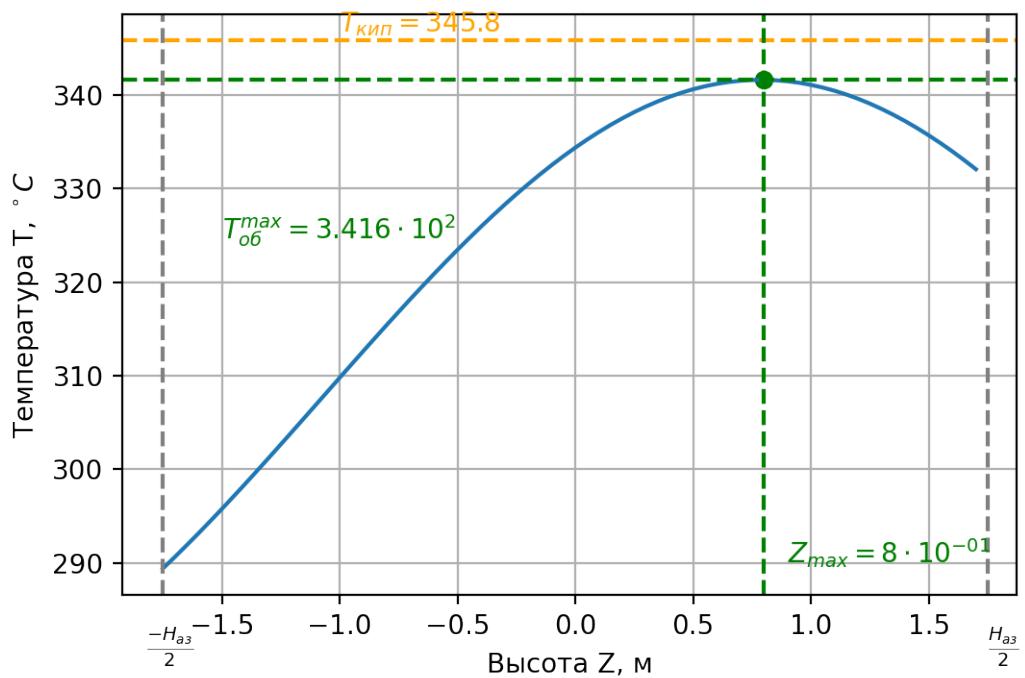


Рисунок 2.4. Изменение температуры стенки твэла по высоте

Из 2.4 видно, что максимальная температура $T_{об}^{max} = 341.6^{\circ}C$ стенки достигается в $Z_{max} = 0.8$. Отсюда можно сделать вывод о том, что также отсутствует поверхностное кипение теплоносителя.

Общий график для распределений теплоносителя и оболочки представлены на 2.5

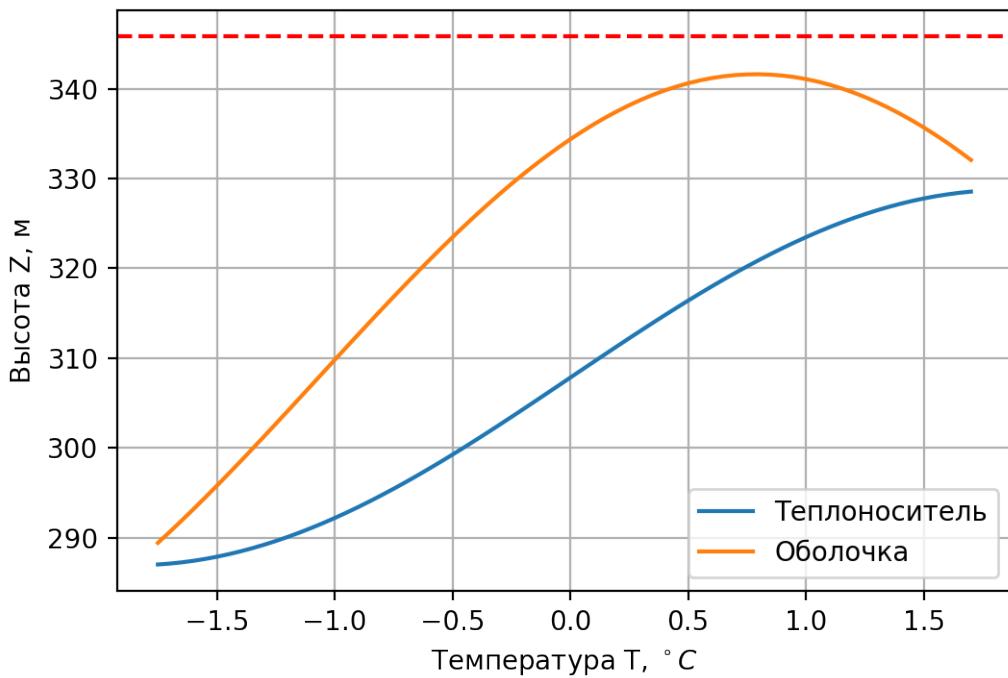


Рисунок 2.5. Изменение температуры стенки твэла и теплоносителя по высоте

2.8. Расчет температуры топлива

Произведём расчет термического сопротивления оболочки, газового зазора и топлива:

$$\begin{aligned}
 \sum R_i &= \frac{\ln \frac{d_{\text{tb}}}{d_{\text{tb}}-2\delta}}{2\pi\lambda_{\text{o6}}} + \frac{\ln \frac{d_{\text{tb}}-2\delta}{d_{\text{топ}}}}{2\pi\lambda_{\text{г.з}}} + \frac{\frac{1}{2} - \frac{d_{\text{отв}}^2}{d_{\text{топ}}^2-d_{\text{отв}}^2} \ln \frac{d_{\text{топ}}}{d_{\text{отв}}}}{2\pi\lambda_{\text{топ}}} = \\
 &= \frac{\ln \frac{9.100 \cdot 10^{-3}}{9.100 \cdot 10^{-3} - 2.6500 \cdot 10^{-4}}}{2 \cdot \pi \cdot 2.010 \cdot 10^1} \\
 &\quad + \frac{\ln \frac{9.100 \cdot 10^{-3} - 2.6500 \cdot 10^{-4}}{7.530 \cdot 10^{-3}}}{2 \cdot \pi \cdot 3.500 \cdot 10^{-1}} \\
 &\quad + \frac{0.5 - \frac{(1.300 \cdot 10^{-3})^2}{(7.530 \cdot 10^{-3})^2 - (1.300 \cdot 10^{-3})^2} \ln \frac{7.530 \cdot 10^{-3}}{1.300 \cdot 10^{-3}}}{2 \cdot \pi \cdot 3.500} = \\
 &= 3.752 \cdot 10^{-2} \frac{\text{М} \cdot \text{K}}{\text{Вт}}
 \end{aligned}$$

где

- $\lambda_{\text{г.з.}} = 0.35 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ — теплопроводность газового слоя
- $\lambda_{\text{o6}} = 23 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ — теплопроводность оболочки
- $\lambda_{\text{топ}} = 3 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ — теплопроводность топлива

Распределение температур в топливе по высоте активной зоны:

$$T_{\text{топ}}(z) = T_{\text{ср}}(z) + \sum R_i \cdot q_{\max} \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot z}{H_{\text{эф}}}\right)$$

График изменения температуры топлива по высоте представлен на 2.6

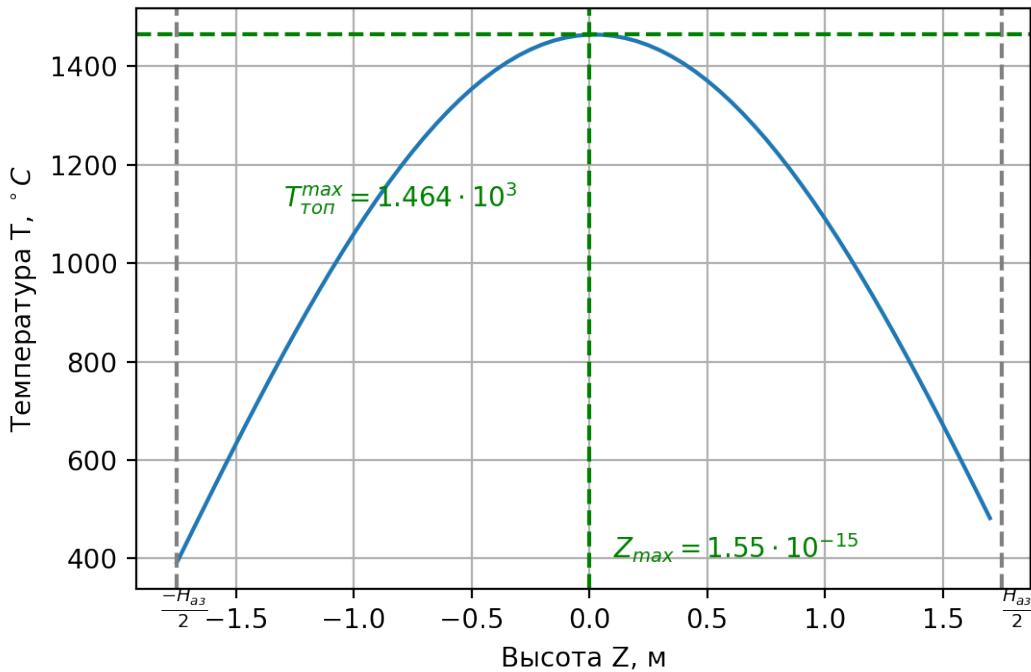


Рисунок 2.6. Изменение температуры топлива по высоте

Максимальная температура топлива $T_{\text{топ}} = 1559^{\circ}\text{C}$ при $Z_{\max} = 0\text{м}$. Максимально допустимая температура топлива при авариях определяется температурой плавления оксида урана и составляет с некоторым запасом 2600°C . Однако в условиях нормальной эксплуатации максимально допустимая температура топлива определяется склонностью топлива к усиленному распуханию.

2.9. Определение перепадов давления и необходимой мощности насосов на прокачку

Для того чтобы определить мощность на прокачку теплоносителя через реактор, найдем перепад давления в ТВС Гидравлическое сопротивление трения по формуле Дарси:

$$\Delta P_{\text{тр}} = \xi_{\text{тр}} \cdot \frac{H_{\text{а3}}}{d_{\Gamma}} \cdot \frac{w^2}{2} \rho_{\text{cp}} = 1.349 \cdot 10^{-02} \frac{3.500}{9.263 \cdot 10^{-03}} \cdot \frac{(5.629)^2}{2} \cdot 7.165 \cdot 10^2 = 5.785 \cdot 10^4 \text{ Па}$$

где

- w , средняя скорость теплоносителя:

$$w = \frac{G_{\text{peak}}}{\rho_{\text{cp}} \cdot S_{\text{прок}} \cdot N_{\text{TBC}}} = \frac{1.579 \cdot 10^4}{7.165 \cdot 10^2 \cdot 2.402 \cdot 10^{-02} \cdot 1.630 \cdot 10^2} = 5.629 \text{ м/с}$$
(14)

- $\rho_{\text{cp}} = 720 \text{ Па}$ — средняя плотность среды

Потеря напора на ускорение:

$$\Delta P_{\text{уск}} = \left(\frac{G_{\text{peak}}}{N_{\text{TBC}} \cdot S_{\text{нпox}}} \right)^2 \cdot \left(\frac{1}{\rho_{\text{вых}}} - \frac{1}{\rho_{\text{вх}}} \right) = \left(\frac{1.579 \cdot 10^4}{1.630 \cdot 10^2 \cdot 2.402 \cdot 10^{-02}} \right)^2 \cdot \left(\frac{1}{6.808 \cdot 10^2} - \frac{1}{7.521 \cdot 10^2} \right) = 2.265 \cdot 10^3 \text{ Па}$$
(15)

, где $\rho_{\text{вых}} = 680.8 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2}$, $\rho_{\text{вх}} = 752.1 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2}$.

Нивелирный напор:

$$\Delta P_{\text{нив}} = \rho_{\text{cp}} \cdot g \cdot H_{\text{а3}} = 7.165 \cdot 10^2 \cdot 9.807 \cdot 3.500 = 2.459 \cdot 10^4 \text{ Па}$$

Местное сопротивление:

$$\Delta P_{\text{мест}} = \frac{\left(\frac{1.579 \cdot 10^4}{163 \cdot 2.402 \cdot 10^{-02}} \right)^2}{2} \cdot \left(\frac{2.6}{7.521 \cdot 10^2} + \frac{13 \cdot 0.45}{7.165 \cdot 10^2} + \frac{0.26}{6.808 \cdot 10^2} \right) = 9.761 \cdot 10^4 \text{ Па}$$

где $\xi_{\text{вх}} = 2.6$ — коэффициент сопротивления на входе в кассету; $\xi_{\text{вых}} = 0.26$ — коэффициент сопротивления на выходе из кассеты, $\xi_{\text{реш}} = 0.45$ — коэффициент сопротивления при проходе через дистанцирующую решетку Общее сопротивление каналов:

$$\Delta P = \Delta P_{\text{тр}} + \Delta P_{\text{уск}} + \Delta P_{\text{нив}} + \Delta P_{\text{мест}} = 1.823 \cdot 10^5 \text{ Па}$$

Мощность, необходимая для прокачки теплоносителя через весь реактор:

$$N_{\text{пр}} = N_{\text{TBC}} \frac{\Delta P \cdot G_{\text{TBC}}}{\eta_{\text{нас}} \cdot \rho_{\text{вх}}}$$

, где $\eta_{\text{нас}} = 0.8$ — КПД насоса

$$N_{\text{пр}} = 163 \cdot \frac{1.823 \cdot 10^5 \cdot 9.685 \cdot 10^1}{0.8 \cdot 7.521 \cdot 10^2} = 4.783 \cdot 10^6 \text{ Вт}$$

КПД реактора с учетом потерь на прокачку теплоносителя:

$$\eta' = \frac{Q_{\text{эл}} - N_{\text{пр}}}{Q_{\text{теп}}} = \frac{1.000 \cdot 10^9 - 4.783 \cdot 10^6}{2.904 \cdot 10^9} = 3.427 \cdot 10^{-01}$$

2.10. Выводы из теплофизического расчета

По итогам теплогидравлического расчета были определены основные термодинамические и теплогидравлические параметры РУ ВВЭР-1000. Были выполнены следующие поставленные задачи:

1. Произведен выбор турбины и определён её КПД равный 0.342 с учетом мощности, необходимой на прокачку теплоносителя.
2. Были найдены зависимости температуры оболочки и теплоносителя от высоты АЗ, было выяснено, что поверхностного кипения не наблюдается, и максимальная температура оболочки твэла 341.6°C не превышает предельно допустимую.
3. Определена зависимость температуры топлива от высоты АЗ, максимальная температура топлива 1464°C не превышает предельное значение 1900°C .

3. Нейтронно-физический расчет

3.1. Постановка задачи

В рамках данного этапа работы будет выполнены следующие задачи:

1. Ячеичный расчет для определения характеристик ТВС в приближении бесконечной решетки

Расчет ячеек без выгорания

Построение модели полиячеек и их расчет без выгорания

Расчет длительности цикла и выгорания при частичных перегрузках

3.2. Описание инструмента ячеичного расчета

Для расчета свойств ТВС использовались возможности программного комплекса GETERA-93. Программа представляет собой инструмент для расчета нейтронно-физических характеристик активной зоны методом вероятностей первых столкновений, предоставляющий одномерный расчет активных зон сложной геометрии благодаря полиячеичным расчетам.

Данная программа разрабатывалась для группового расчета полей нейтронов на основе метода вероятностей первых столкновений (ВПС) полей нейтронов в ячейках реакторов, содержащих элементы с различной геометрией.

3.3. Модель ячейки

Для проведения расчетов определим исходные характеристики ТВС РУ-ВВЭР-1000

Таблица 3.1: Исходные данные для ТВС проектируемого РУ ВВЭР-1000

Характеристика	Значение
Форма ТВС	Шестигранная
Количество твэлов в ТВС	317
Топливо	UO_2
Обогащение топлива, %	4.7
Плотность топлива, г/см ³	9.015
Количество циклов перегрузки топлива	3
Состав оболочки	99%Zr + 1%Nb
Замедлитель	H_2O

3.4. Расчет ячеек без выгорания

Для расчета использовалась модель одномерной элементарной эквивалентной цилиндрической ячейки с радиусами 0.398, 0.455, 0.67 мм. Геометрия элементарной ячейки представлена на рисунке 3.1

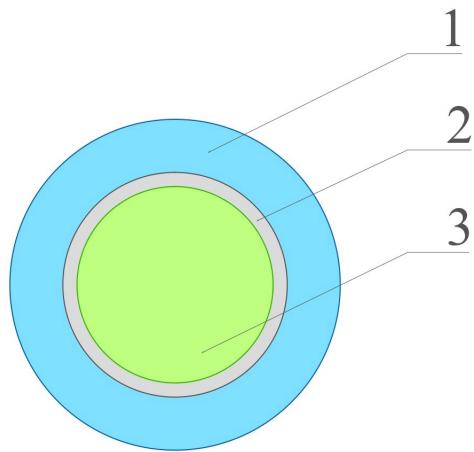


Рисунок 3.1. Геометрия элементарной топливной ячейки. 1 — замедлитель, 2 — оболочка, 3 — топливо

Рассчитаем необходимые концентрации элементов входящих в состав ячейки

Таблица 3.2: Концентрации элементов

Элемент	Концентрация
Топливо	
U^{235}	$9.4518 \cdot 10^{-4}$
U^{238}	$1.9165 \cdot 10^{-2}$
O	$4.02 \cdot 10^{-2}$
Оболочка	
Zr	$4.25047 \cdot 10^{-2}$
Nb	$5.55308 \cdot 10^{-4}$
Замедлитель	
H	$4.98456 \cdot 10^{-2}$
O	$2.49228 \cdot 10^{-2}$

Используя входные данные зададим расчетную ячейку с указанными в 3.2 составами и радиусами. Произведем расчет K_∞ бесконечной решетки твс заданной модели с помощью команды :FIER заданной во входном файле расчета GETERA-93. Результатующее значение:

$$K_\infty = 1.38$$

3.5. Расчет полиячеек без выгорания

Перед дальнейшими расчетами выгорания необходимо усложнить модель активной зоны, представив ее бесконечной решеткой полиячеек. Такой подход позволит учесть ячейки с различной степенью выгорания в активной зоне для дальнейшего расчета при использовании частицных перегрузок.

Разобьём ячейку на 3 фрагмента (в соответствии с заданным количеством циклов выгорания), для которых предполагается применимым одномерное приближение. Связи между фрагментами зададим с помощью следующей матрицы перетечек записанной в переменную ALOUT расчетного файла:

$$\begin{pmatrix} 0.0 & 0.5 & 0.5 \\ 0.5 & 0.0 & 0.5 \\ 0.5 & 0.5 & 0.0 \end{pmatrix}$$

Повторный расчет заданной поличяечки дает аналогичный результат расчету элементарный ячейки без выгорания, из чего можно сделать вывод что модель полиячейки построена верно.

3.6. Расчет длительности цикла и выгорания при частичных перегрузках

Используя полиячеочную модель из предыдущего этапа воспроизведем трехциклический процесс перегрузок топлива и подберем оптимальное время цикла выгорания при энерговыделении $q_v = 110$. Оптимальным будет считать такое время цикла, по прошествии которого $K_\infty = 1.03$, что эквивалентно $K_{\text{eff}} = 1.0$ для нашей модели.

Используя команду :CORR переопределим составы, добавив концентрации свежего топлива во все фрагменты полиячеек последовательно.

Оптимальное время цикла по результатам расчета:

$$T_{\text{цикла}} = 450 \text{ суток}$$

В таблице 3.3 представлены характеристики, полученные из расчета выгорания

Таблица 3.3: Характеристики процесса выгорания

Характеристика	Значение
K_{∞} в начале цикла	1.1667
Длина цикла, сут	450
Длина кампании, сут	1350
Выгорание, МВт · сут / кг	53.541
Годовой расход ТВС, 1 / год	42.2
Плутониевый вектор в конце кампании, %	
Pu^{38}	1.97
Pu^{39}	55.18
Pu^{40}	21.35
Pu^{41}	15.59
Pu^{42}	5.91
Содержание делящегося изотопа ($\text{Pu}^{39} + \text{Pu}^{41}$) в отработавшем топливе, кг/тонна топлива	14.87
Содержание делящегося изотопа (U^{235}) в отработавшем топливе, кг/тонна топлива	11.4
Загрузка делящихся нуклидов, кг/тонна топлива	47

4. Исследование полей температур и теплогидравлических параметров при нестандартных режимах работы реактора

4.1. Постановка задачи

Необходимо провести анализ и расчет профиля энерговыделения в активной зоне а также основных теплогидравлических параметров, таких как температуры и давления теплоносителя, топлива, внешней и внутренней оболочки. В работе рассматриваются следующие режимы работы реактора:

- На номинальной мощности
- На повышенной мощности
- При отключении одного из четырёх ГЦН
- При отключении двух из четырёх ГЦН

4.2. Описание расчетного инструмента

Оценка энерговыделения и теплогидравлических параметров произведена с использованием программного кода «ТРЕТОН» [9]. Данный инструмент разработан для расчета теплогидродинамических процессов в активной зоне реакторов типа ВВЭР. В нем реализованы алгоритмы многоуровневого решения уравнений теплообмена и гидродинамики. В качестве расчетной модели ТРЕТОН использует приближение анизотропного пористого тела с бесчехловыми ТВС совместно с локальным расчетом распределения температуры в каждом твэле

4.3. Расчет теплогидравлических характеристик при работе на номинальной мощности

Для первоначальной валидации программного кода и подбора входных данных для дальнейшего анализа рассматриваемых режимов, произведем анализ полей температур и теплогидравлических параметров для модели стационарного режима работы ВВЭР-1000 на номинальной мощности

Первым этапом необходимо определить распределение тепловыделения по всем расчетным элементам. Исходные расчетные элементы представляют собой 163 топливные ячейки ТВС. Для построения расчетной модели активная зона была разбита на 8 групп по радиусу от центра и на 30 зон по высоте, по которым были сгруппированы расчетные ячейки. Компоновка расчетных ячеек и разбиение по группам представлены на картограмме 4.1

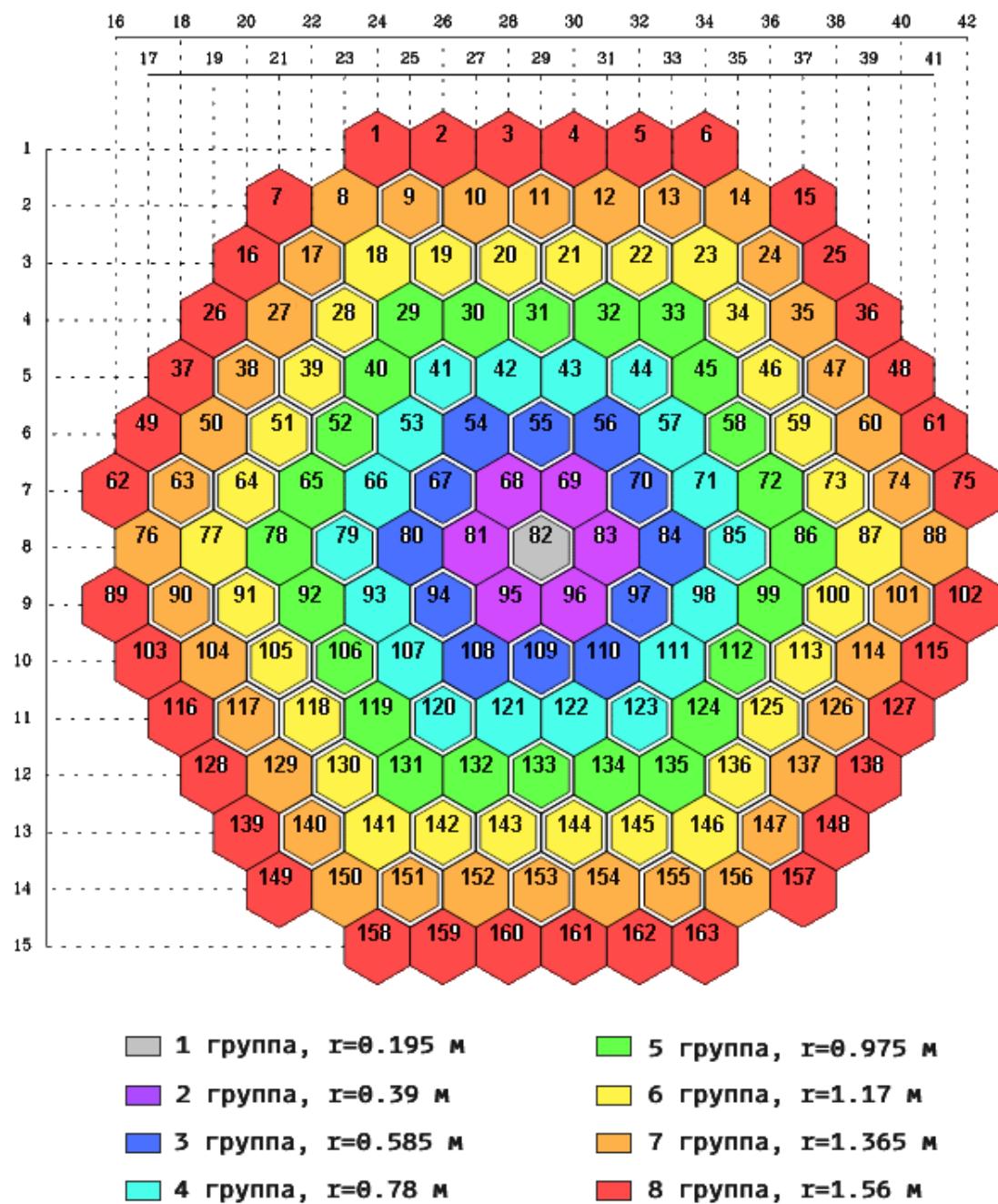


Рисунок 4.1. Картограмма ячеек моделируемой АЗ для расчетного кода «ТРЕТОН» и их разбиение на группы по радиусу

Для каждой зоны были рассчитаны тепловыделения, нормируя на соответствующие K_r^i , K_z^j , где $i = \overline{1, 8}$, $j = \overline{1, 30}$.

Распределение K_r по группам было подобрано ориентируясь на следующие зависимости:

$$K_r(r) \sim J_0\left(\frac{\xi_0 r}{R_{\text{эфф}}}\right) \approx -\alpha r^2 + \beta \quad (16)$$

, распределение коэффициента неравномерности по радиусу в приближении параболической функции

$$\sum_{i=1}^8 K_r^i N_i = N_{\text{TBC}} \pm 0.01 \quad (17)$$

, где N_i — количество ТВС в i -той группе по радиусу — условие нормировки распределения коэффициента неравномерности по радиусу. Коэффициент β параболической функции был подобран из условия, что в центре $K_r(r = 0)$ должна быть равна табличному значению K_r из 2.1, коэффициент α для удовлетворения соотношения 17. Полученные значения распределения коэффициента неравномерности по радиусу для каждой группы представлены в таблице 4.1.

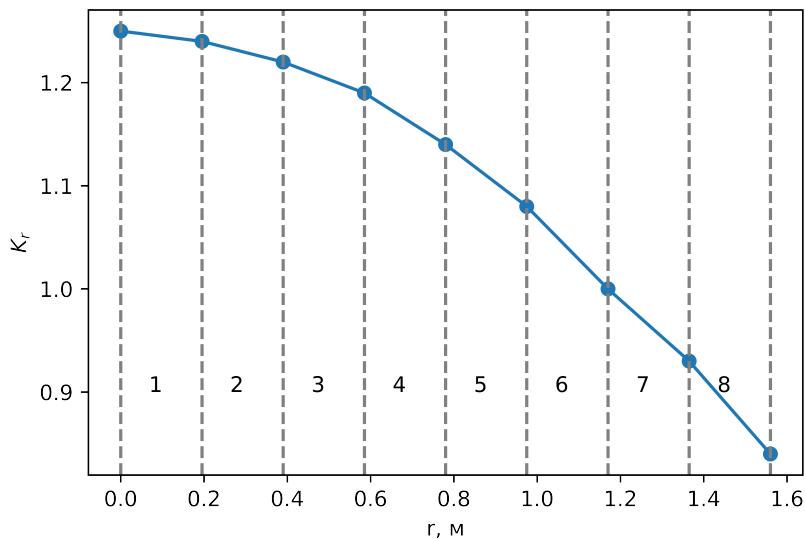


Рисунок 4.2. Распределение коэффициента неравномерности по радиусу для восьми групп ТВС

Таблица 4.1: Коэффициент неравномерности энерговыделения по радиусу для групп ТВС

Номер группы	Значение K_r^i
1	1.24
2	1.22
3	1.19
4	1.14
5	1.08
6	1.00
7	0.93
8	0.84

Распределение коэффициента неравномерности по высоте K_z определяется как:

$$K_z(z) = K_z \cos \left(\frac{\pi z}{H_{\text{эфф}}} \right) \quad (18)$$

где $z = -H_{\text{A3}}/2, H_{\text{A3}}/2$ м.

Распределение K_z по высоте представлено на рис 4.3

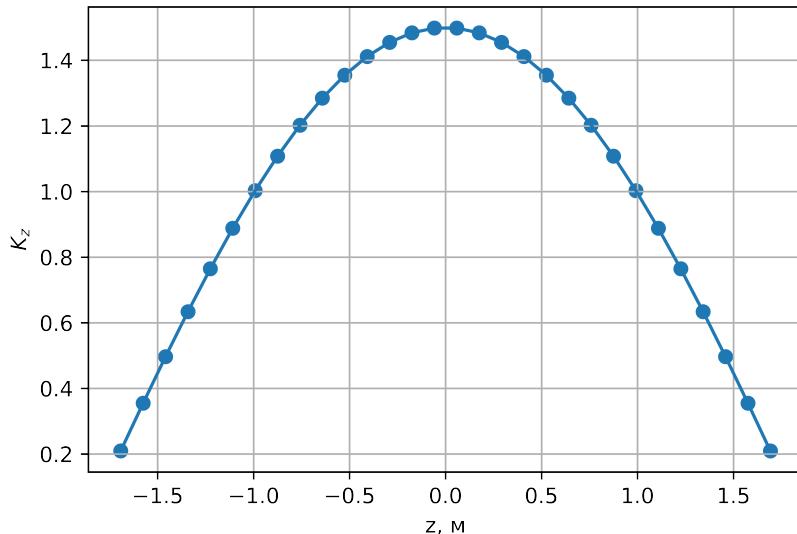


Рисунок 4.3. Распределение коэффициента неравномерности по высоте активной зоны

Из полученных распределений K_r , K_z было определено распределение теп-

ловыделения для всех групп расчетных элементов

$$Q(z, r) = K_z(z) K_r(r) \frac{Q_{\text{теп}}}{N_{\text{TBC}} \cdot 30} \quad (19)$$

$$= K_r(r) K_z \cos \left(\frac{\pi z}{H_{\text{эфф}}} \right) \frac{Q_{\text{теп}}}{N_{\text{TBC}} 30} \quad (20)$$

На основе соотношения 19 был сформирован входной файл q6.txt с тепловыделением для всех расчетных элементов в соответствии с картограммой 4.1

Далее были проведены калибровочные расчеты для определения входных параметров файла tnehuso.ini, соответствующих проектируемой РУ. Основным критерием выбора параметров было соответствие вычисленному программой «ТРЕТОН» расходу полученному ранее в рамках теплофизического расчета.

Таким образом расчетным кодом было получено значение расхода $G_{\text{расч}} = (1.570 \pm 0.016) \cdot 10^4 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$, что соответствует полученному ранее значению $G_{\text{peak}} = 1.579 \cdot 10^4 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$ в пределах погрешности. Значения входных параметров файла tnethuso.ini, при которых достигнут такой расход приведены в таблице ??

Таблица 4.2: Входные параметры расчета при номинальном режиме работы

Параметр	Значение
Шаг твэлов, мм	12.75
Поперечный размер расчетной области, м	0.241
Продольный размер расчетной области, м	0.118
Кол-во твэлов в ТВС, шт	317
Расчетный дисбаланс	0.005
Входное давление, Па	15800000
Выходное давление, Па	15686938

На основе описанных входных параметров был произведен расчет с шагом по времени $dt = 0.0005$ для 100 итераций. По результату расчета были построены зависимости основных теплогидравлических параметров и сопоставлены со значениями, полученными в теплофизическому расчете.

По итогам расчета на основе результатов файла t_tepl.dat была построено распределение температуры теплоносителя по высоте активной зоны, усредненное по всем расчетным элементам. График распределения вместе с распределением теплоносителя по высоте, рассчитанном в рамках теплофизического расчета представлен на рисунке 4.4.

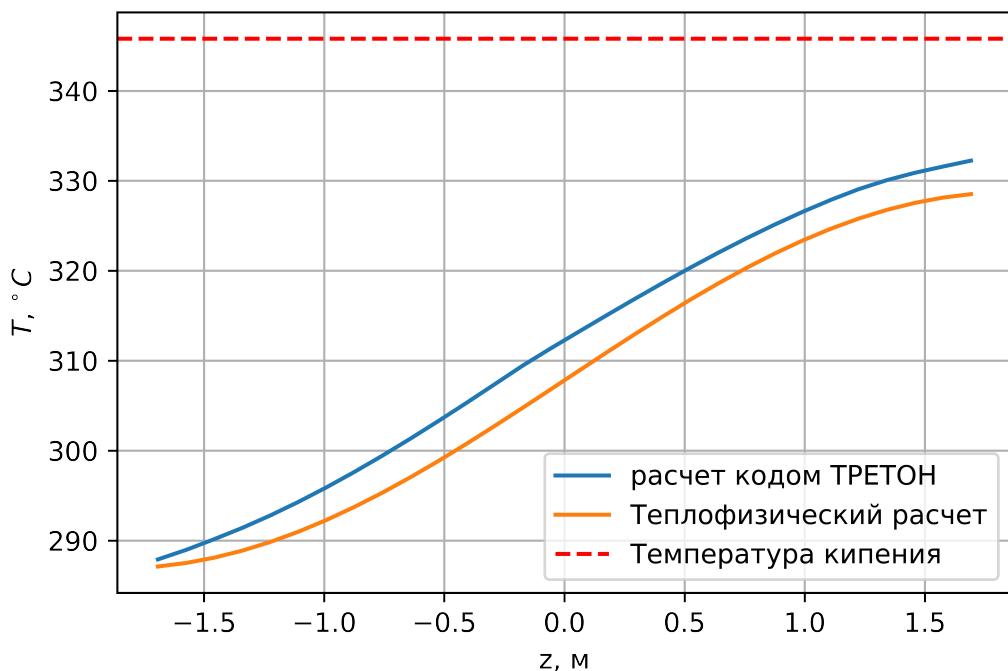


Рисунок 4.4. Распределение температуры теплоносителя по высоте

Из рис 4.4 видно, что среднеквадратичная ошибка составляет $\Delta T_{\text{теп}} = 3.6^{\circ}\text{C}$. Несовпадение результатов обусловлено отличием среднего коэффициента теплоемкости рассчитываемого в ТРЕТОН с результатом теоретического расчета. Отсюда мы можем сделать вывод о соответствии полученных результатов ранее рассчитанным в рамках приемлемой погрешности.

Для номинального режима работы реактора были построены распределения температуры теплоносителя по высоте для каждой рассматриваемой групп и для кассеты, с максимальной температурой на выходе из активной зоны. Распределения представлены на рисунках 4.5, 4.6. Несовпадение зависимостей для температуры внешней оболочки обусловлено описанным ранее несоответствием среднего коэффициента теплоемкости.

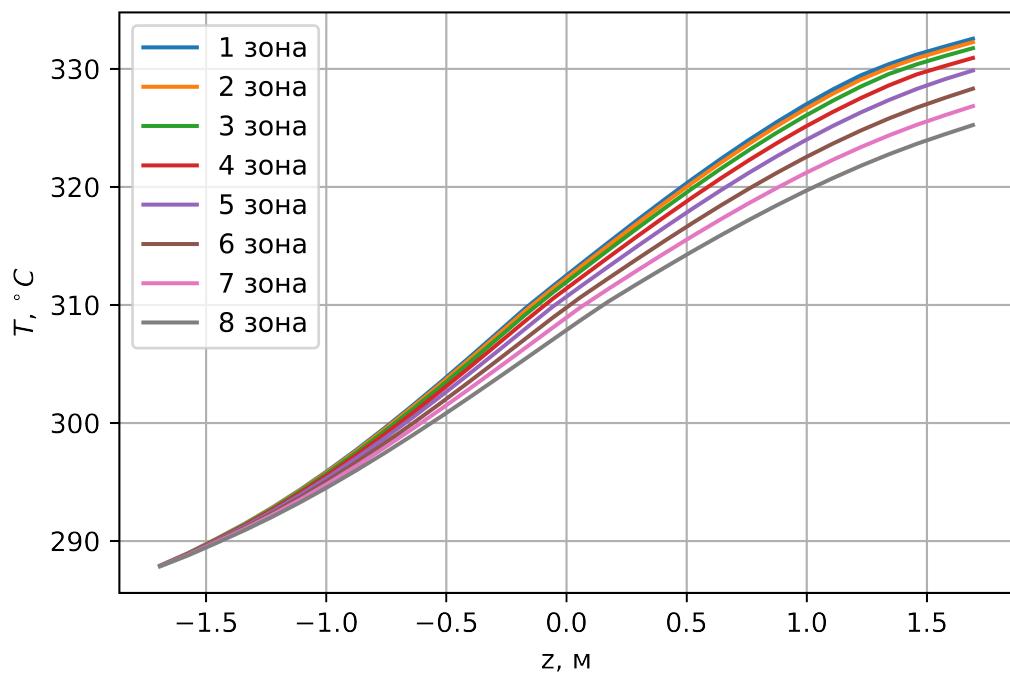


Рисунок 4.5. Распределение температуры теплоносителя по высоте для каждой зоны по радиусу

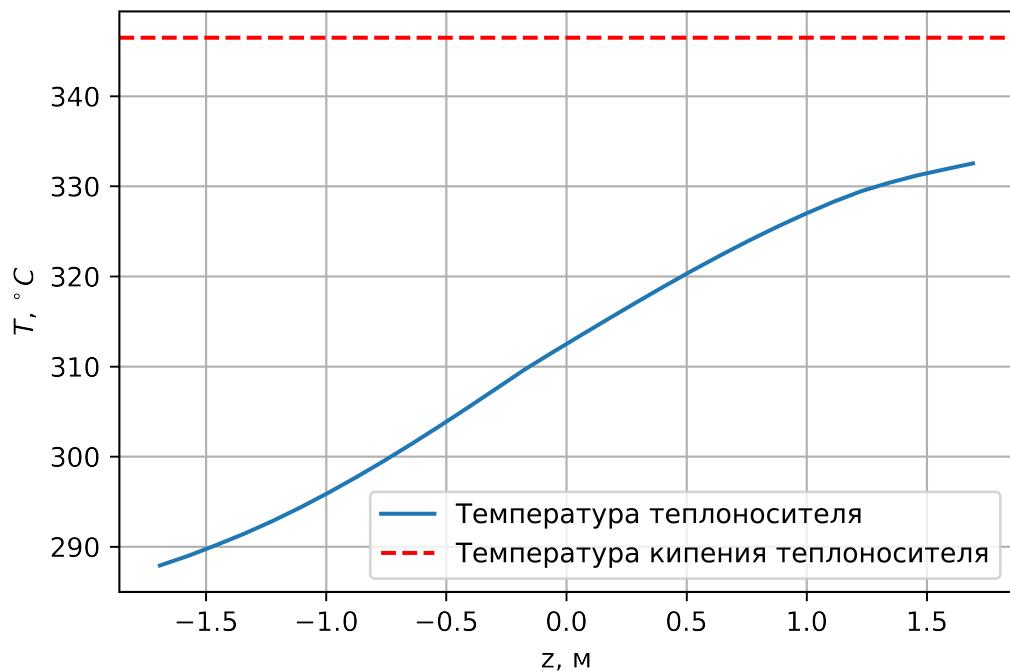


Рисунок 4.6. Распределение температуры теплоносителя по высоте для кассеты с максимальной температурой на выходе из АЗ

Из 4.6 видно, что максимальная температура теплоносителя $T_{\text{теплНом}}^{\max} = 332.5^{\circ}\text{C}$. При рассматриваемом давлении в активной зоне 15.8 МПа температура кипения теплоносителя составляет 346.5°C , отсюда следует что запас до кипения составляет 13.65°C

Для топлива были получены распределения температуры топлива по высоте активной зоны для ячейки с максимальной температурой топлива в центре АЗ и распределение температуры топлива по высоте АЗ для всех групп по радиусу. Зависимости представлены на рисунках 4.7, 4.8. Рассчитанная температура топлива заметно отличается от теплофизического расчета ввиду особенностей задания характеристик материалов входящих в состав топлива.

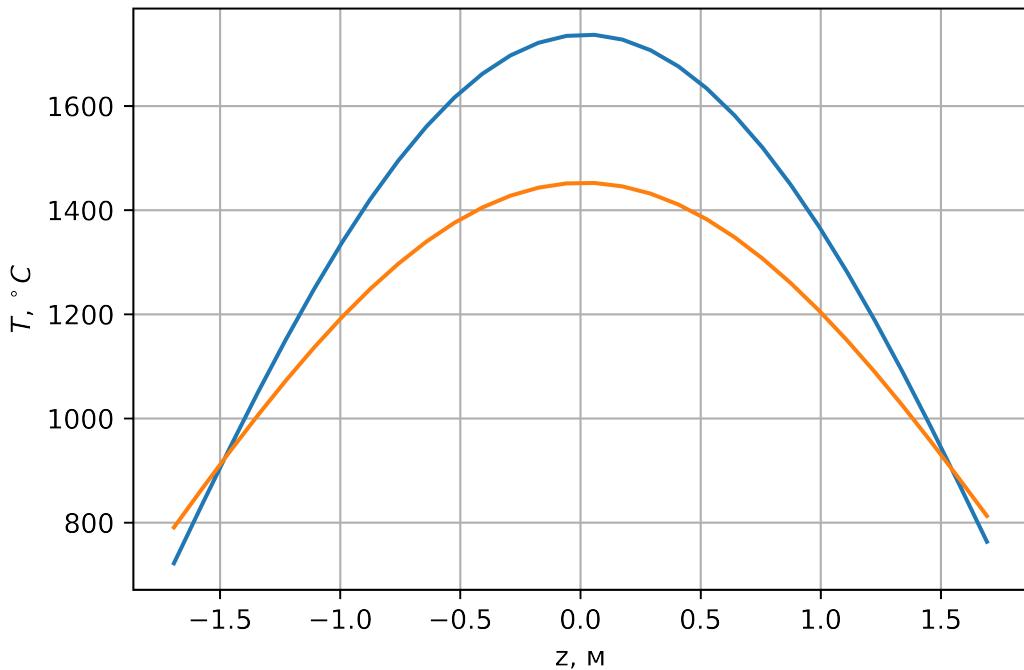


Рисунок 4.7. Распределение температуры топлива по высоте АЗ для кассеты с максимальной температурой топлива в центре АЗ

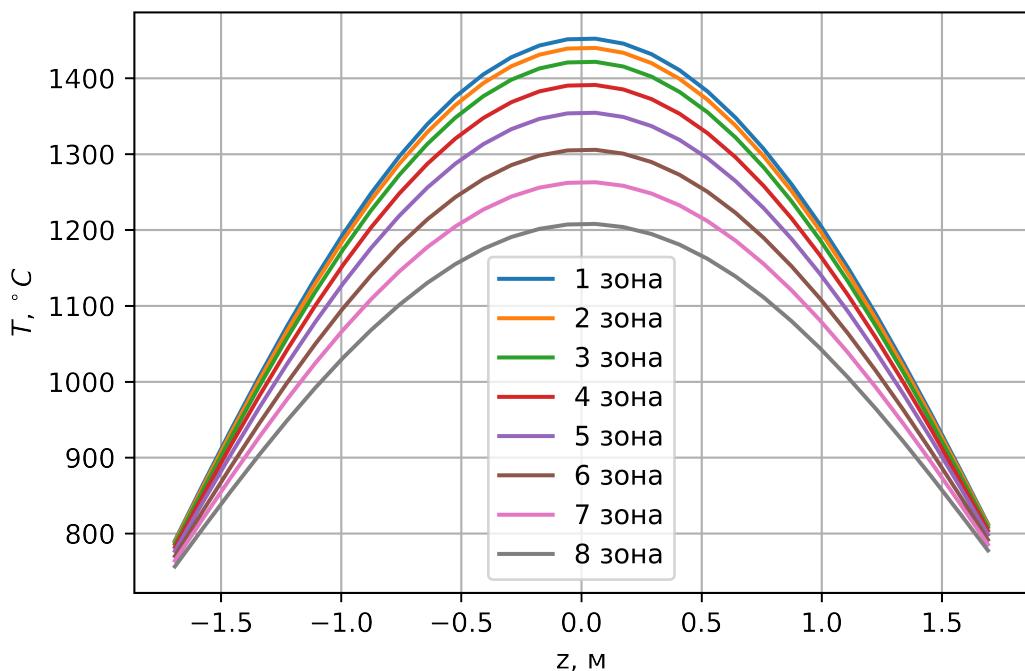


Рисунок 4.8. Распределение температуры топлива по высоте для всех групп по радиусу А3

Из графиков видно, что максимальная температура топлива $T_{\text{топНом}}^{\max} = 1087.4^{\circ}\text{C}$, что не превышает максимально допустимую при авариях температуру плавления оксида урана 2600°C

Для ячейки с максимальной температурой также были построены зависимости температуры оболочек от высоты активной зоны. Из рис 4.9 максимальная температура оболочки составляет 346.46°C , запас до кипения теплоносителя около стенки составляет 0.04°C , из чего можно сделать вывод что пристеночное кипение не наблюдается

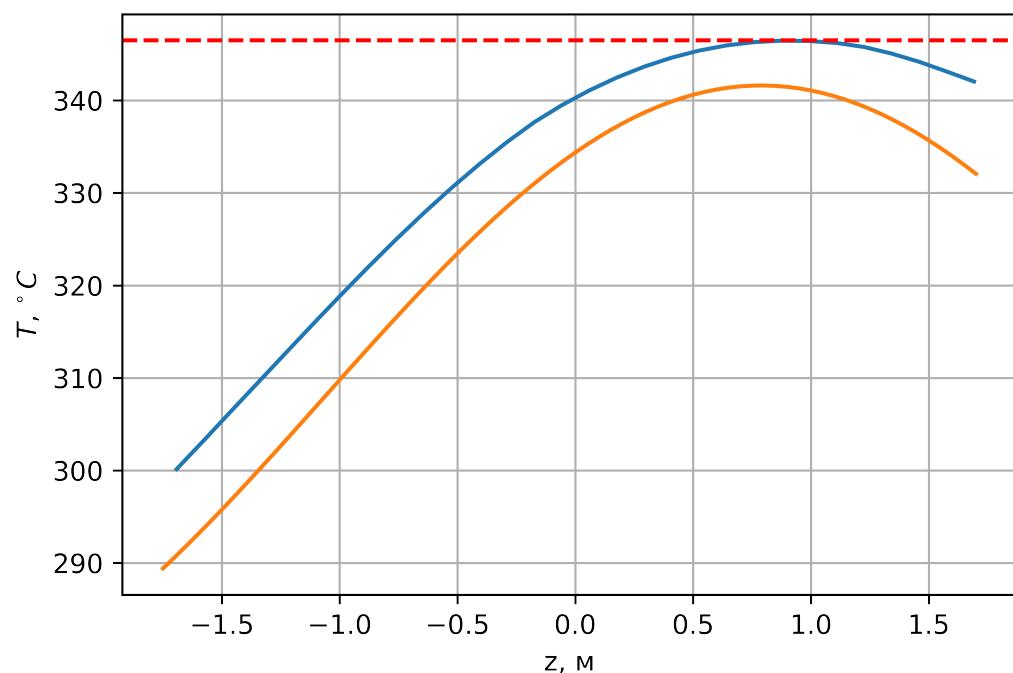


Рисунок 4.9. Распределение температуры внешней оболочки по высоте для кассеты с максимальной температурой на выходе из А3

На рис 4.10 представлен общий график для распределения температур наружной, внутренней оболочки и теплоносителя

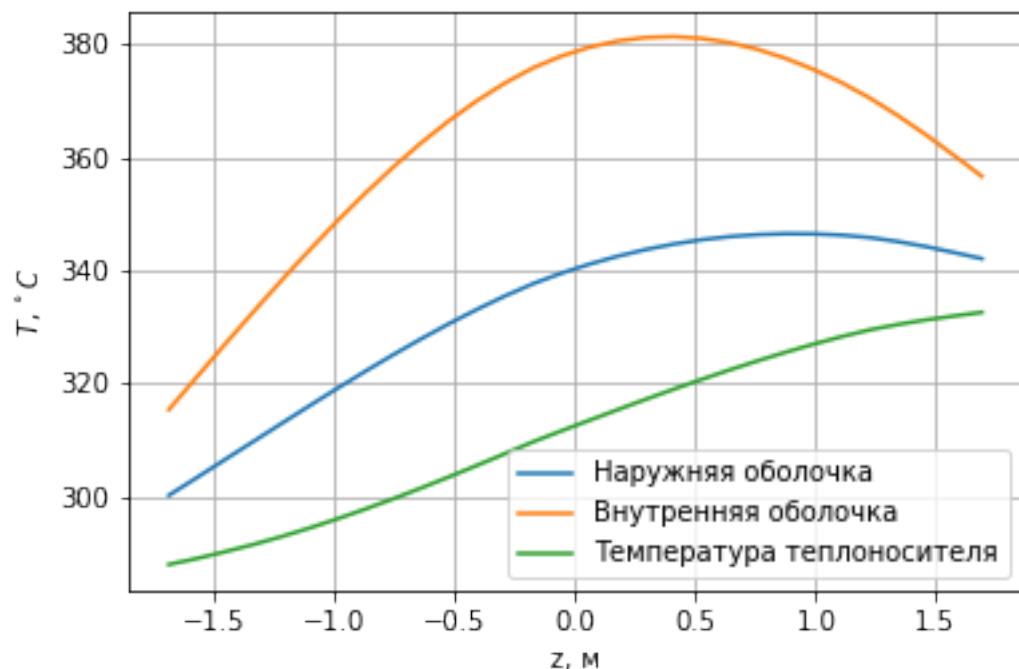


Рисунок 4.10. Распределение температур оболочек и теплоносителя по высоте АЗ

Для ячейки с максимальной температурой топлива на выходе также было построено распределение давления теплоносителя по высоте активной зоны, которое представлено на рисунке 4.11.

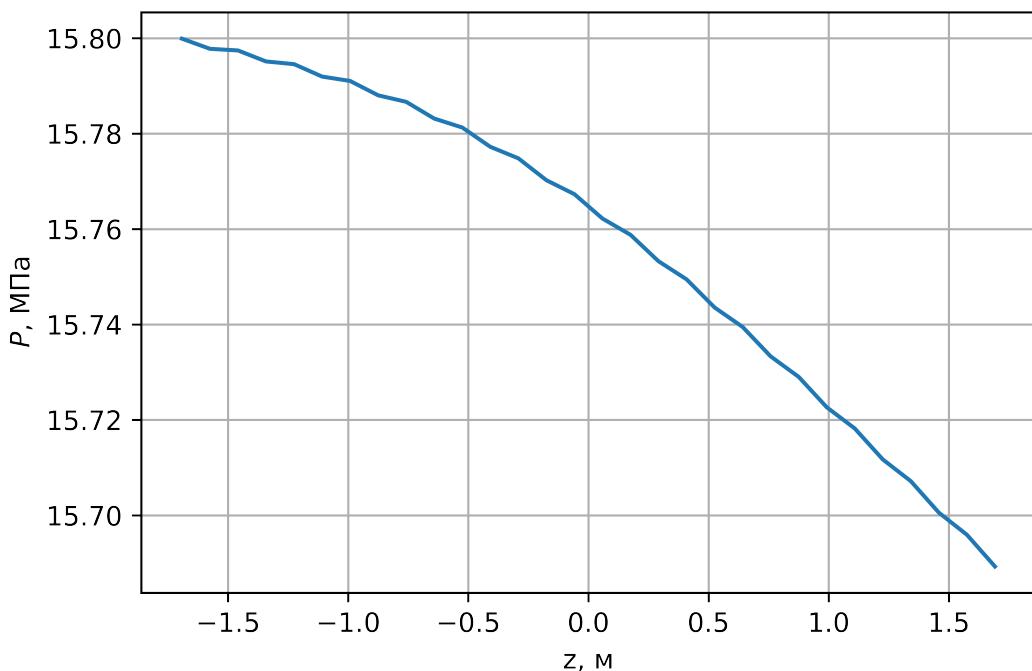


Рисунок 4.11. Распределение давления в кассете с максимальной температурой на выходе по высоте активной зоны

Для каждой ТВС были расчитаны подогревы теплоносителя. На 4.12 представлено распределение подогрева по каждой кассете ТВС, на 4.13 усредненное распределение по радиальным группам ТВС в соответствии с разбиением представленным на картограмме 4.1.

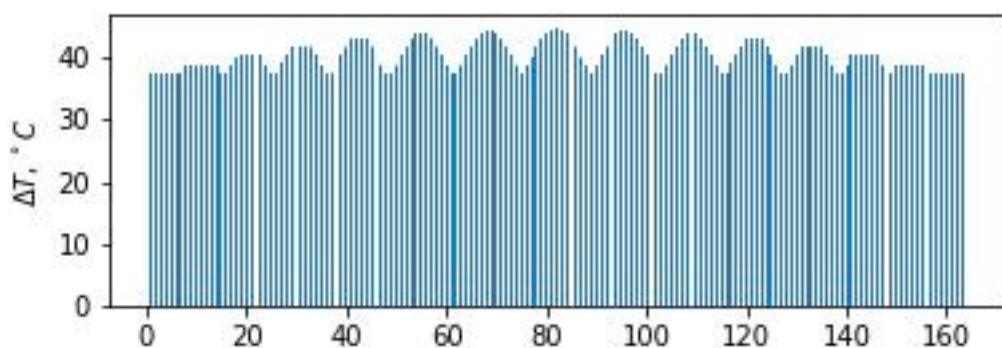


Рисунок 4.12. Распределение подогревов ТВС

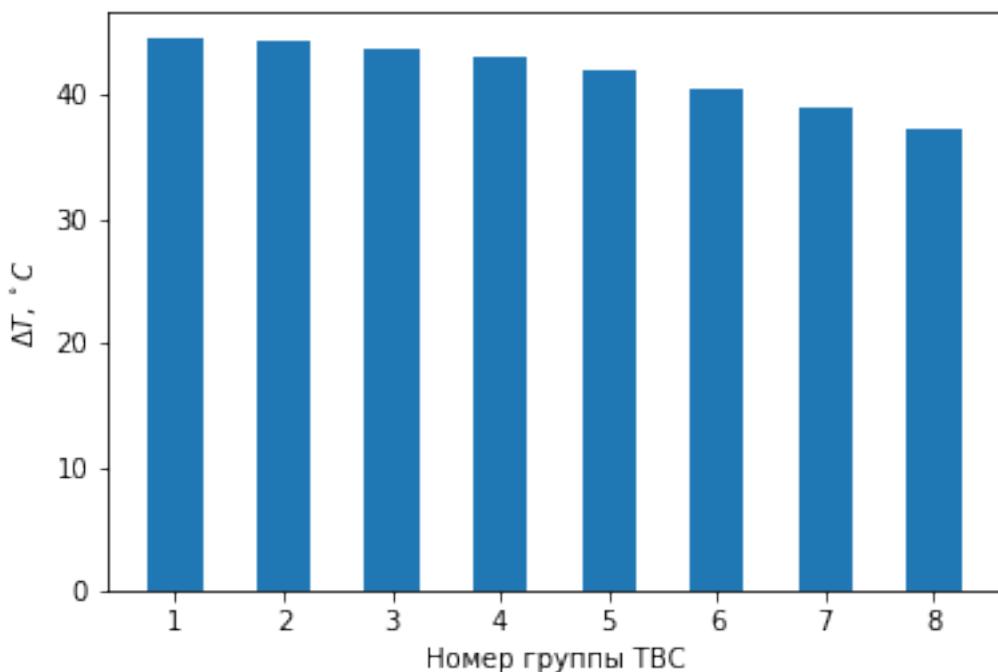


Рисунок 4.13. Распределение подогревов ТВС усредненное по группам

4.4. Расчет теплогидравлических характеристик при работе на повышенной мощности

Ввиду наличия успешных практик перевода работы реакторов ВВЭР-1000 на повышенную мощность для рассматриваемой реакторной установки были выполнены соответствующие теплогидравлические расчеты программным комплексом «ТРЕТОН».

Было проведено исследование температур РУ при разных мощностях с целью подбора оптимальной мощности. Оптимальной принималась такая мощность выше номинальной, при которой вклад возникающего пристеночного кипения незначителен в приближении расчетной модели. Экспериментальным путем было выяснено, что вклад пристеночного кипения незначителен, если если наблюдается превышение температуры кипения теплоносителя не более чем на $3 ^\circ C$. Результаты исследования температур в сравнении с номинальным режимом представлены в таблице 4.3. Были рассмотрены режимы работы реактора при повышении мощности на 5%, 10% и 15% и номинальных значений температур на входе в активную зону. Для моделирования таких режимов работы полученная зависимость тепловыделения от радиуса и высоты для номинального режима 19 была промасштабирована коэффициентом $\gamma = \overline{1.05, 1.1, 1.15}$

$$Q_{\gamma N_{\text{ном}}}(z, r) = \gamma \cdot Q(z, r) = K_r(r) K_z \cos\left(\frac{\pi z}{H_{\text{эфф}}}\right) \frac{\gamma \cdot Q_{\text{теп}}}{N_{\text{TBC}} 30} \quad (21)$$

Для сравнения возникающего пристеночного кипения на рисунке 4.14 была построена зависимость температуры внешней оболочки от высоты для всех рассматриваемых мощностей. Из 4.14 для мощностей 10 и 15% выше номинальной наблюдается плато в районе максимума температур в следствие существенного влияния пристеночного кипения. Исходя из этого повышение мощности на 5 % оптимально для дальнейшего анализа ввиду разности температуры оболочки и температуры кипения теплоносителя кипения не более чем на 3 °C. Для выбранной оптимальной повышенной мощности были построены распределения соответствующих температур по высоте, которые представлены на рисунках 4.15, 4.16, 4.17.

Таблица 4.3: Максимальные температуры теплоносителя, топлива и оболочки твэлов при работе РУ на номинальной и повышенной мощности

Тепловая мощность, МВт	2903	3048.8	3194	3339.2
Максимальная температура теплоносителя, °C	332.5	333.9	334.9	336.3
Запас до кипения теплоносителя, °C	13.9	12.6	11.6	10.17
Максимальная температура топлива, °C	1452	1465	1501.8	1538.4
Максимальная температура внешней оболочки	346.46	347.9	349	349.4
Максимальная температура внутренней оболочки	381.3	383	385.9	389.7
Разность температуры кипения теплоносителя и температуры внешней оболочки	0.04	-1.4	-2.5	-2.9

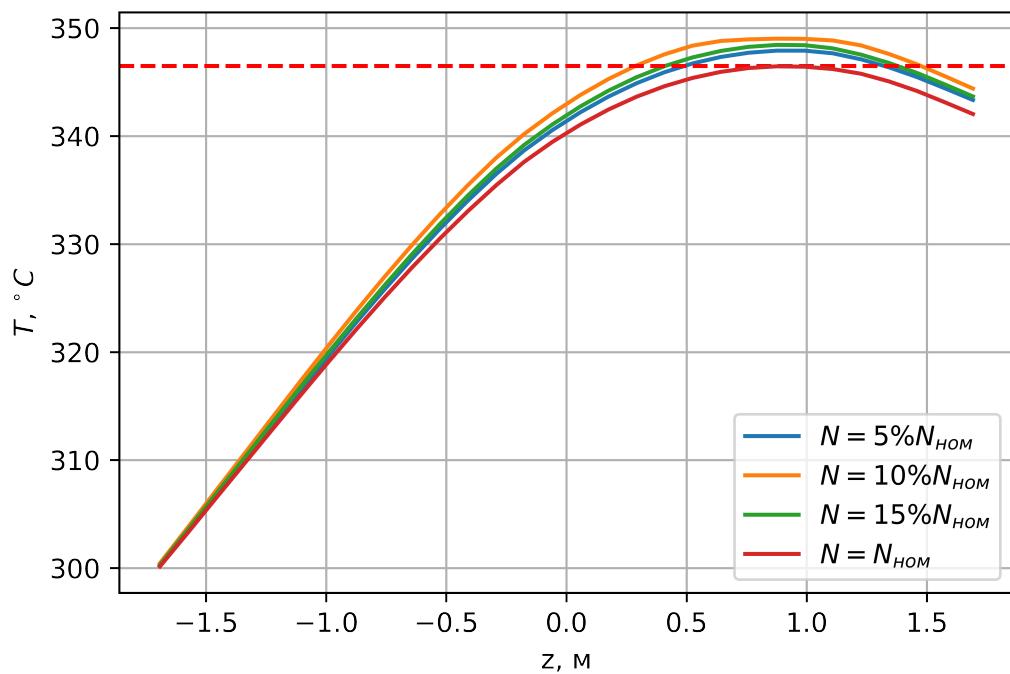


Рисунок 4.14. Распределение температуры внешней оболочки по высоте активной зоны для работы реактора на повышенных мощностях

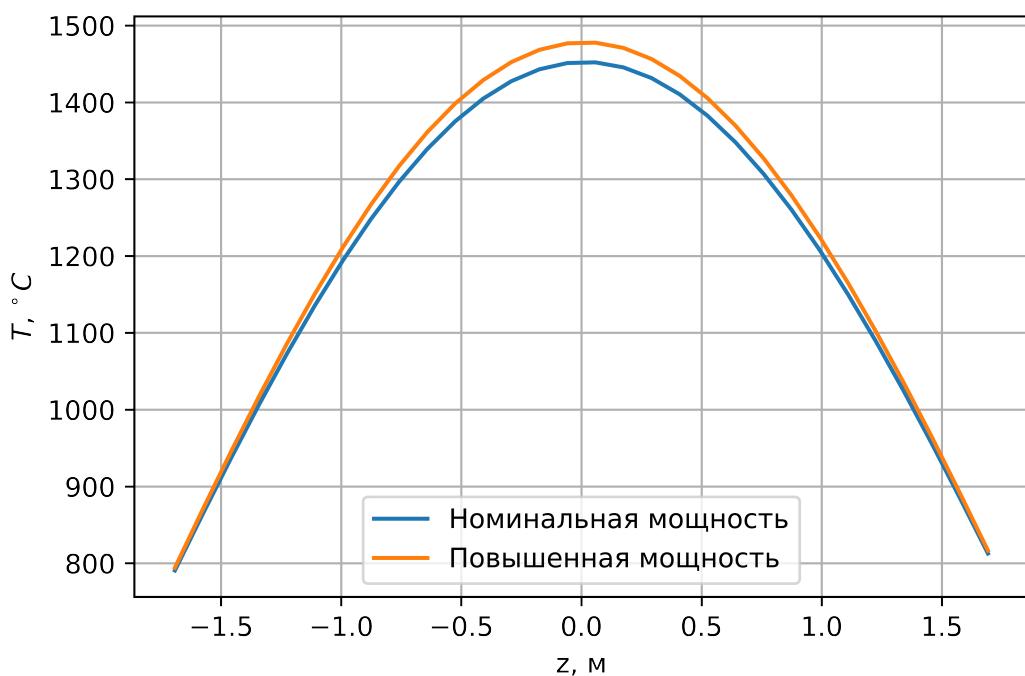


Рисунок 4.15. Распределение температуры топлива по высоте АЗ

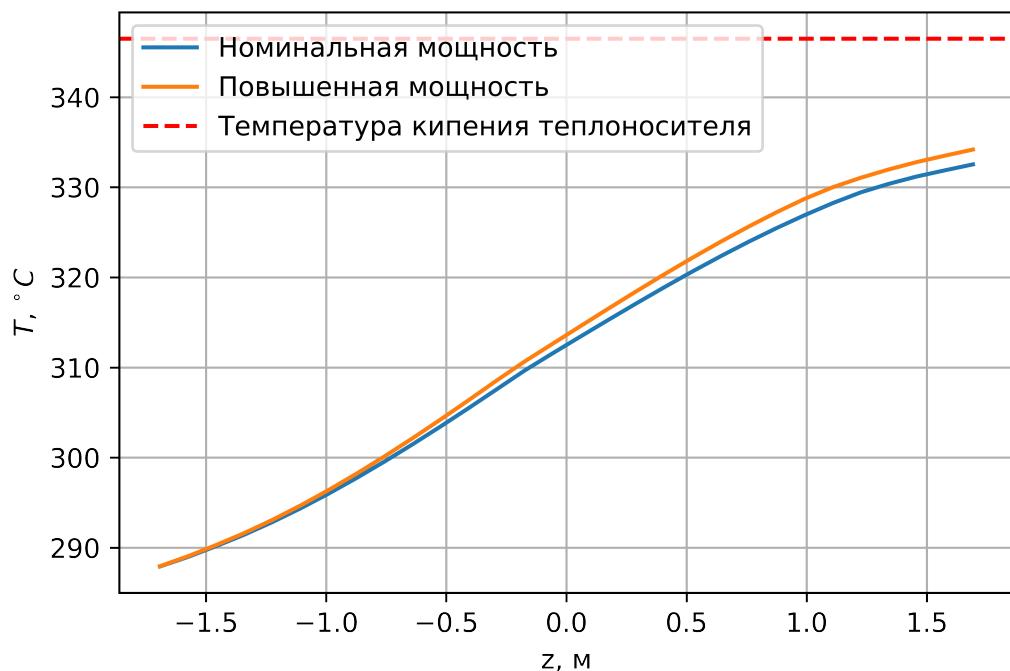


Рисунок 4.16. Распределение температуры теплоносителя по высоте АЗ

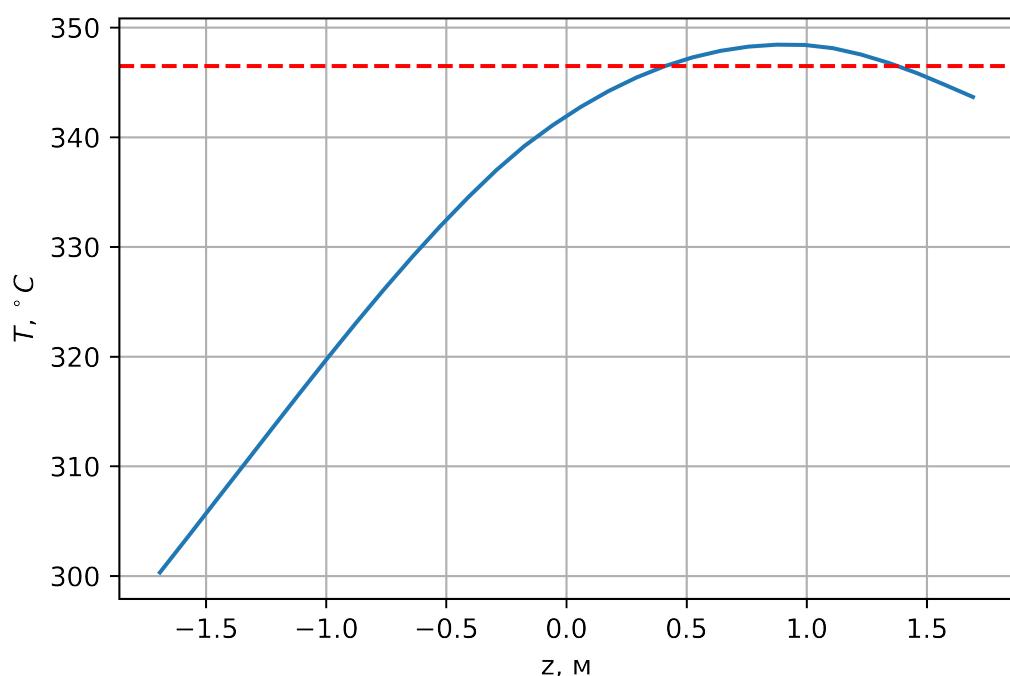


Рисунок 4.17. Распределение температуры наружей оболочки твэлов по высоте для кассеты с максимальной температурой теплоносителя

из 4.3 видно, что при повышении мощности на 5% наблюдается превышение

ние максимальной температуры теплоносителя на 1.65°C , что по прежнему не превышает температуру насыщения. Для кассеты с максимальной температурой теплоносителя наблюдается пристеночное кипение вблизи оболочек твэлов, однако температура оболочки превысила температуру кипения теплоносителя на 1.9°C , что говорит нам о его незначительном вкладе в рамках расчетной модели. Для топлива превышение температуры составило 25.6°C , однако превышения критических для топлива температур не наблюдается. Общий график температур для работы реактора на повышенном уровне мощности представлен на рисунке 4.18

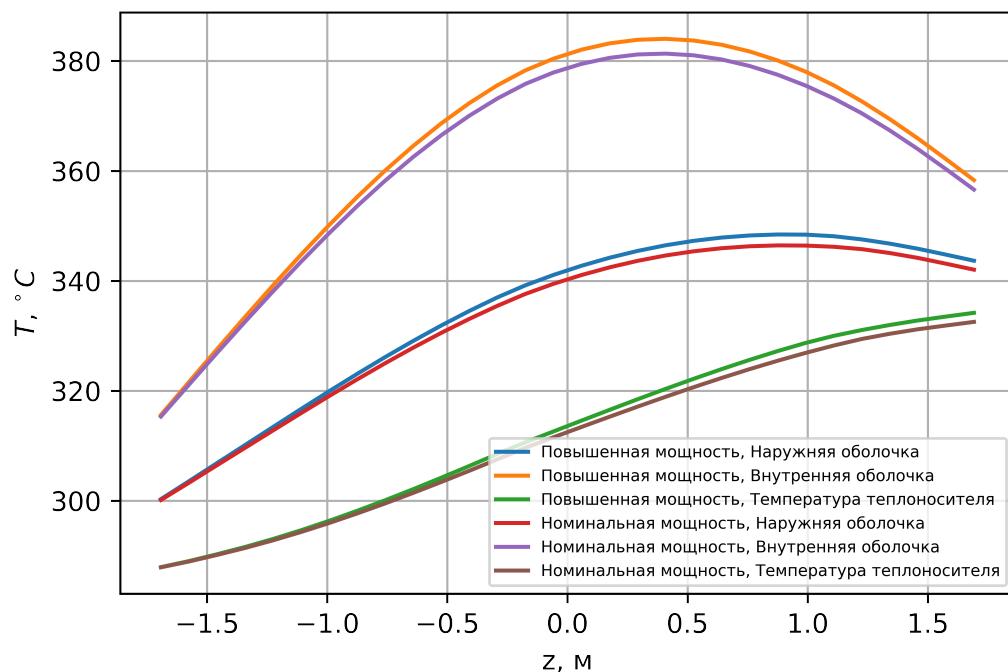


Рисунок 4.18. Распределение температур по высоте АЗ

На рисунке 4.19 представлена зависимость давления в кассете с максимальной температурой от высоты. Для давления наблюдается понижение в центре ТВС на 5 КПа по сравнению с номинальным режимом.

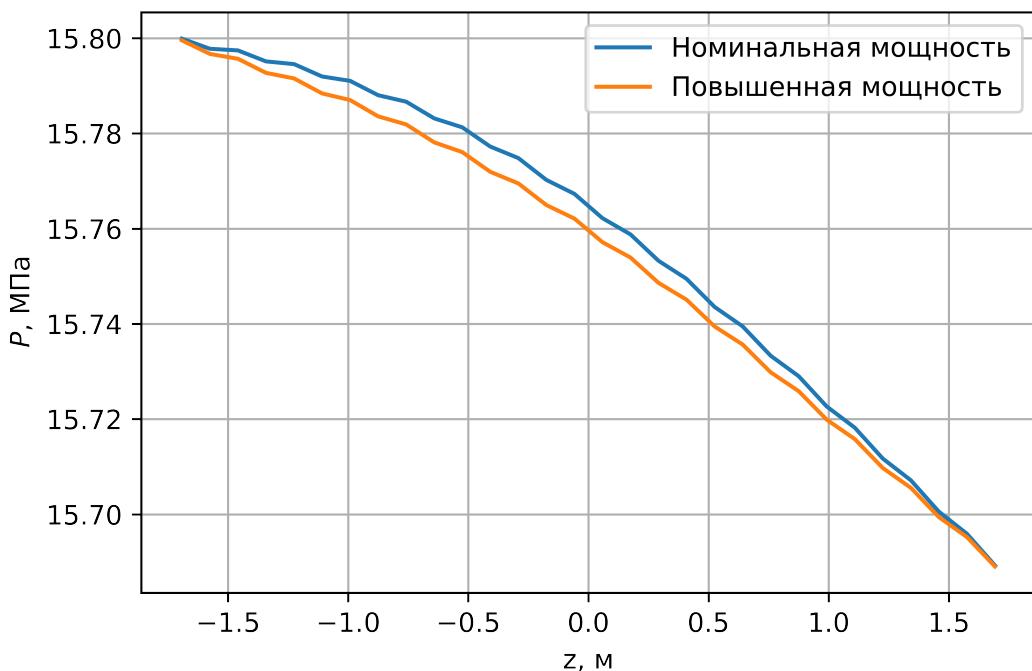


Рисунок 4.19. Распределение давления в кассете с максимальной температурой по высоте А3

Из рисунка 4.20 видно, что при повышении мощности на 5% подогрев между первой и последней расчетными точками в центральной ТВС поднялся на 1.6°C . На рисунке 4.21 представлено распределение подогревов, усредненных по радиальным группам ТВС

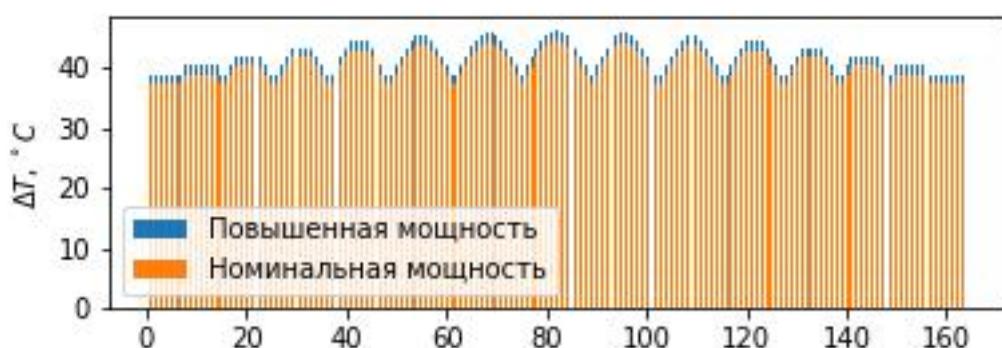


Рисунок 4.20. Распределение подогревов по всем ТВС

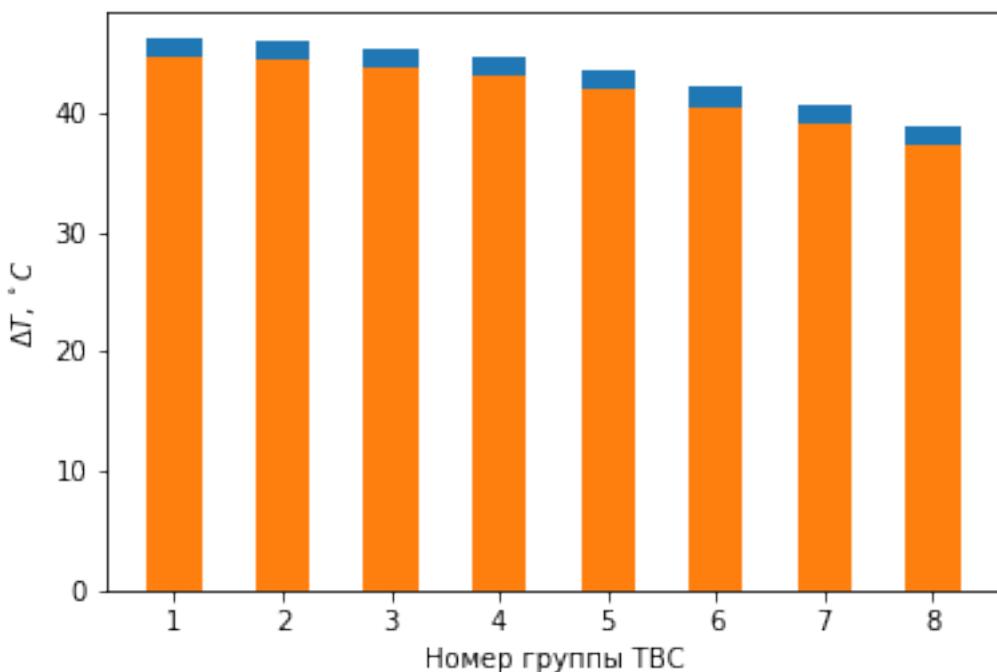


Рисунок 4.21. Распределение подогревов по радиальным группам ТВС

4.5. Расчет теплогидравлических характеристик при отключении одного ГЦН

Для рассматриваемой установки были проведены расчеты основных теплогидравлических параметров в случае отключения одного из четырех ГЦН. Такой режим работы характерен сниженным уровнем мощности и расхода теплоносителя. При моделировании данного процесса был учтен возникающий при отключении петли возникающий обратный ток теплоносителя. В таком случае в петле, для которой ГЦН отключается, температура теплоносителя на входе снижается.

С точки зрения расчетной модели для воспроизведения описанных условий была задана пониженная температура $T_{in}^{low} = 284 {}^\circ\text{C}$ на входе в захоложенные петли. Распределение номеров ячеек по четырем петлям ГЦН представлено на рисунке 4.22. Температура была снижена для ячеек, расположенных в левой верхней области по картограмме 4.22. При задании во входном файле T_IN.TXT расчетного модуля «ТРЕТОН». В файл Q6.TXT входное тепловыделение для всех ячеек было снижено до 67% Q_{nom} ввиду снижения мощности.

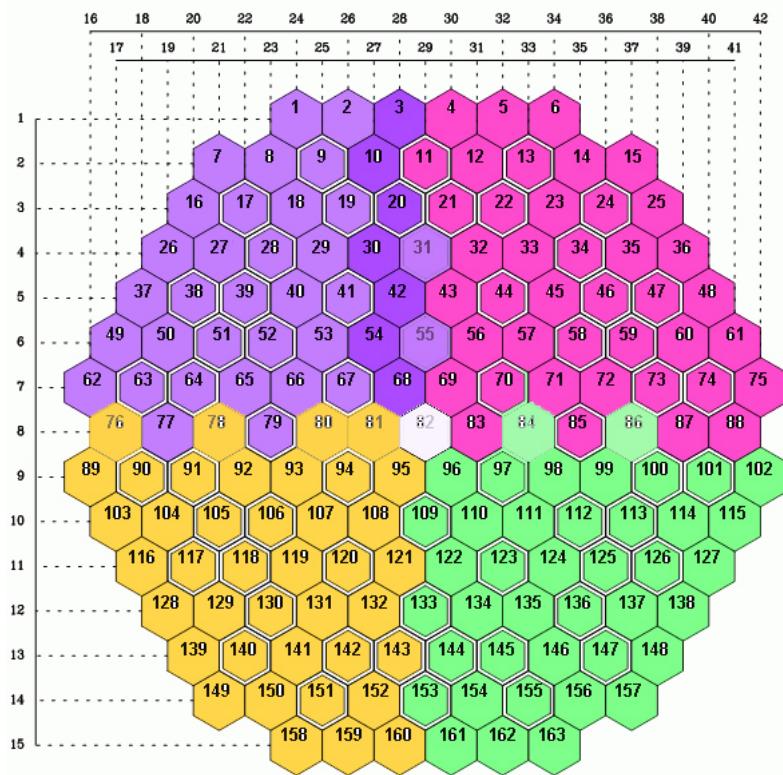


Рисунок 4.22. Распределение номер ТВС по четырем зонам

По результатам расчета получены максимальные значения температур топлива, оболочек и теплоносителя, которые представлены в таблице 4.4

Таблица 4.4: Максимальные температуры теплоносителя, топлива и оболочки твэлов при работе РУ на номинальной и повышенной мощности

Тепловая мощность, МВт	2903	1945
Максимальная температура теплоносителя, $^{\circ}\text{C}$	332.5	324.45
Запас до кипения теплоносителя, $^{\circ}\text{C}$	13.9	22
Максимальная температура топлива, $^{\circ}\text{C}$	1452	1202.2
Максимальная температура внешней оболочки	346.46	335.3
Максимальная температура внутренней оболочки	381.3	361.5
Запас до кипения теплоносителя вблизи оболоки	0.04	11.2

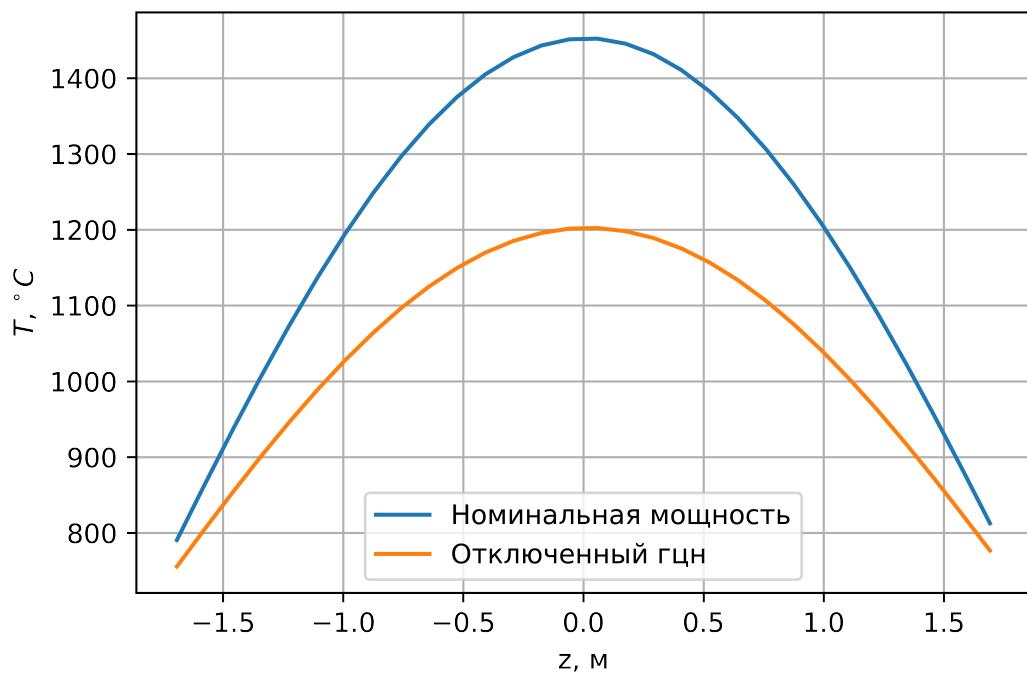


Рисунок 4.23. Распределение температуры топлива по высоте АЗ

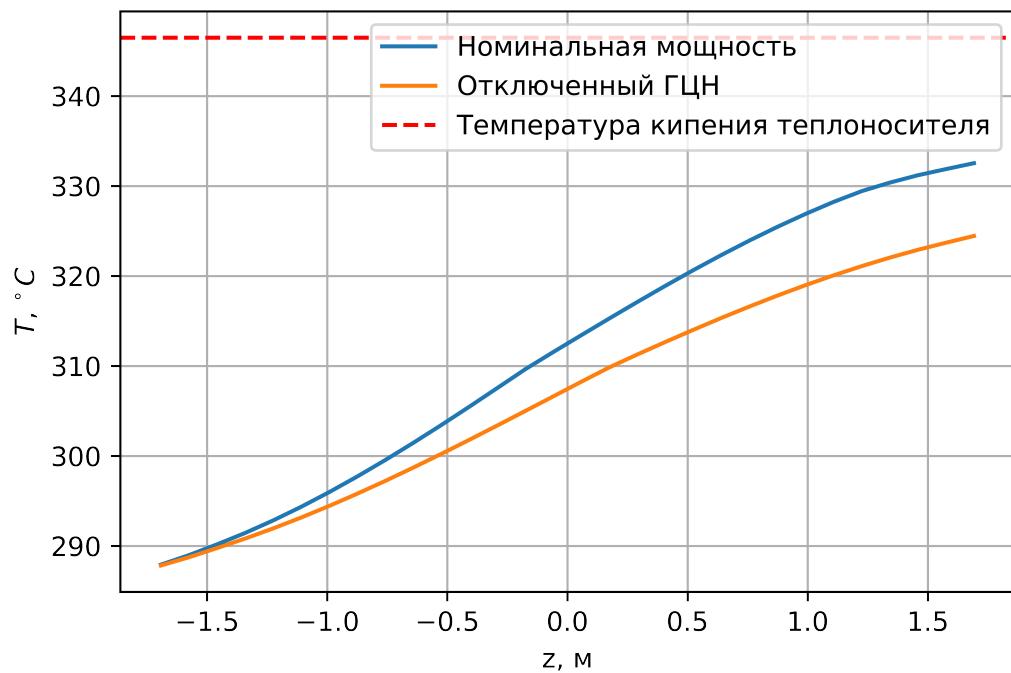


Рисунок 4.24. Распределение температуры теплоносителя по высоте АЗ

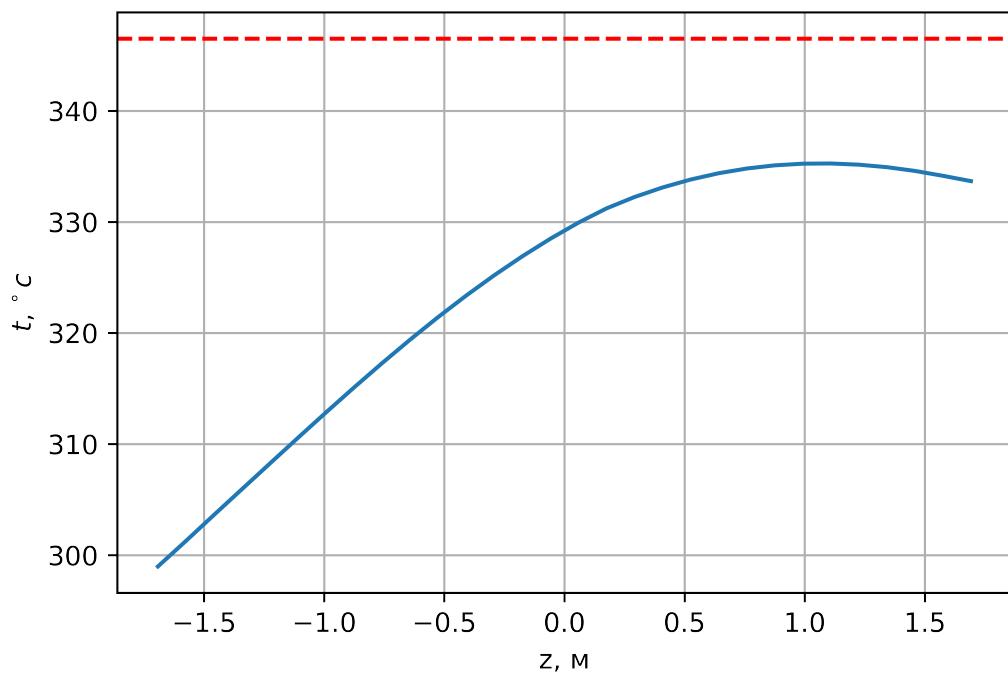


Рисунок 4.25. Распределение температуры наружной оболочки твэлов по высоте для кассеты с максимальной температурой теплоносителя

из 4.4 видно, что при отключении одного из ГЦН наблюдаются снижения максимальных температур и увеличение запаса до кипения. Общий график температур для работы реактора при работе на пониженной мощности в следствие отключения одного из ГЦН представлен на рисунке 4.26

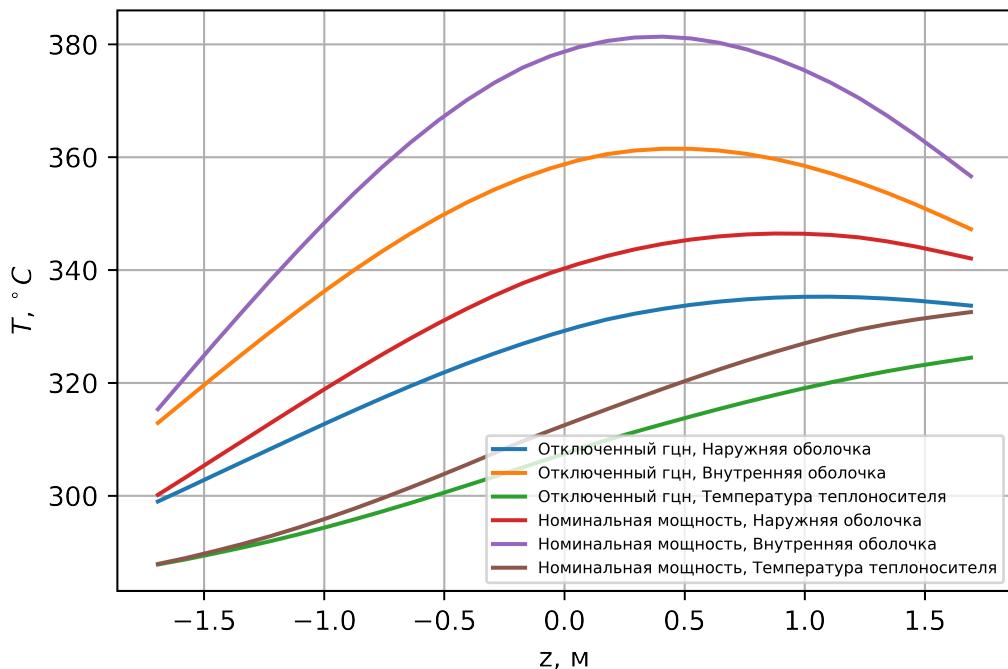


Рисунок 4.26. Распределение температур по высоте АЗ

На 4.27 видно, что при отключении одного ГЧН подогрев в центральной ТВС уменьшился на 8 градусов, средний по всем ТВС подогрев уменьшился на 6.57.

Для наблюдения возникающей при отключении неравномерности поля температур было построено распределение температуры теплоносителя на входе в активную зоны и на выходе из нее. Соответствующие зависимости представлены на 4.29, 4.30. на графиках наблюдается заметный перекос и захолаживание температурного поля в области отключенной петли, возникающий в следствие неравномерности энерговыделения. Для оценки максимального эффекта от неравномерности энерговыделения было построено распределение температуры теплоносителя по высоте АЗ для второй радиальной группы, соответствующей семи ТВС вокруг центрального. Такое распределение выбрано в силу того что для центральной ТВС влияние перекоса на характер зависимости незначительный. Распределение представлено на рисунке 4.31.

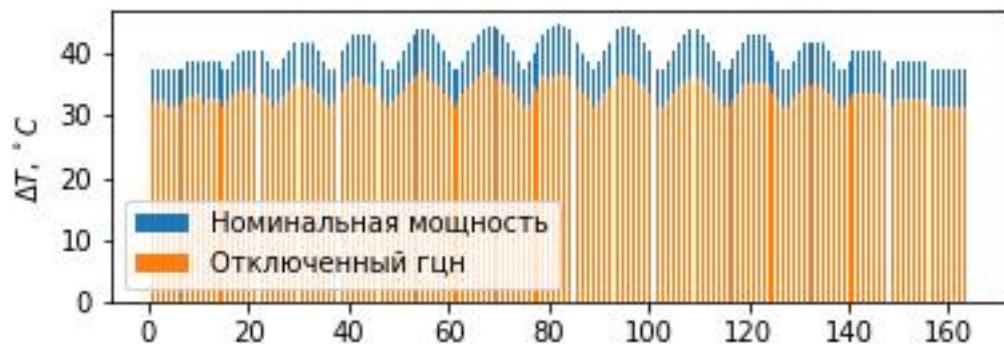


Рисунок 4.27. Распределение подогревов по всем ТВС

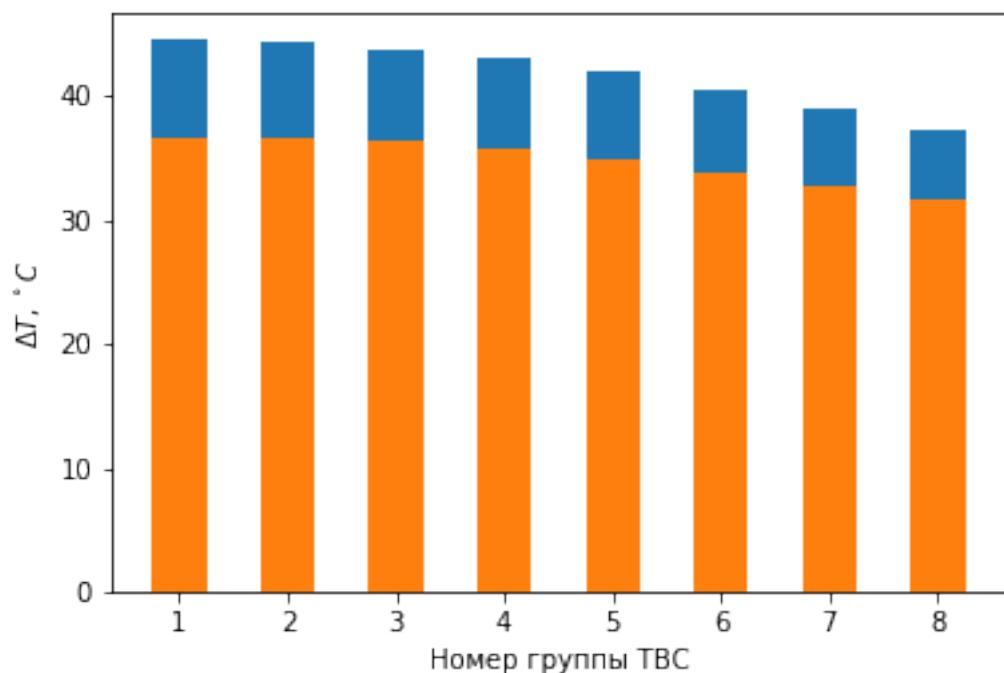


Рисунок 4.28. Распределение подогревов по радиальным группам ТВС

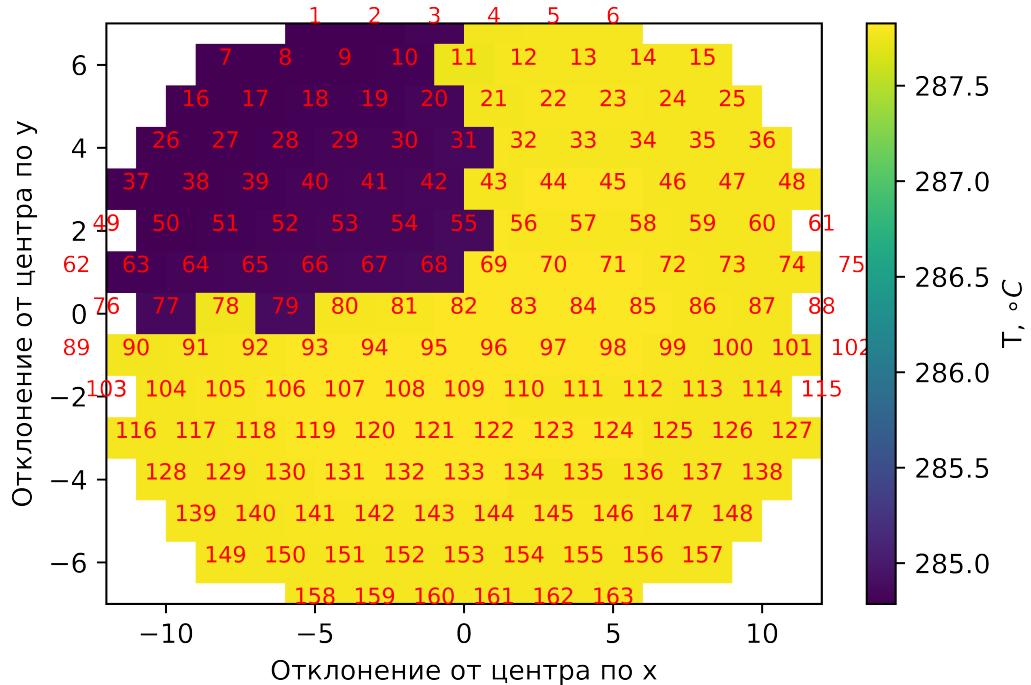


Рисунок 4.29. Распределение температуры теплоносителя по ТВС на входе в А3

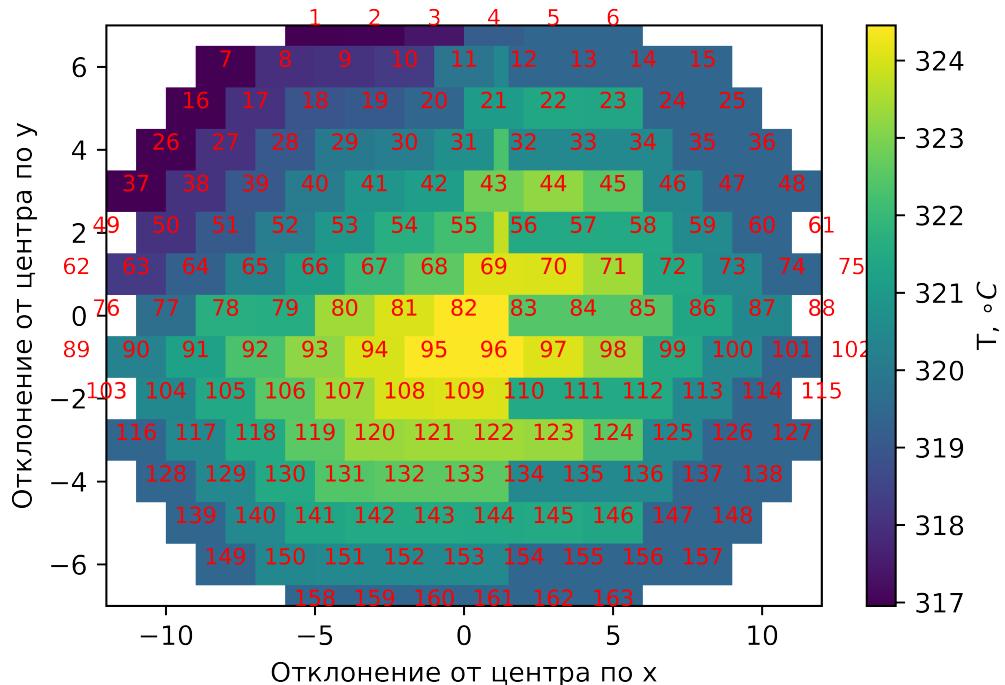


Рисунок 4.30. Распределение температуры теплоносителя по ТВС на выходе из А3

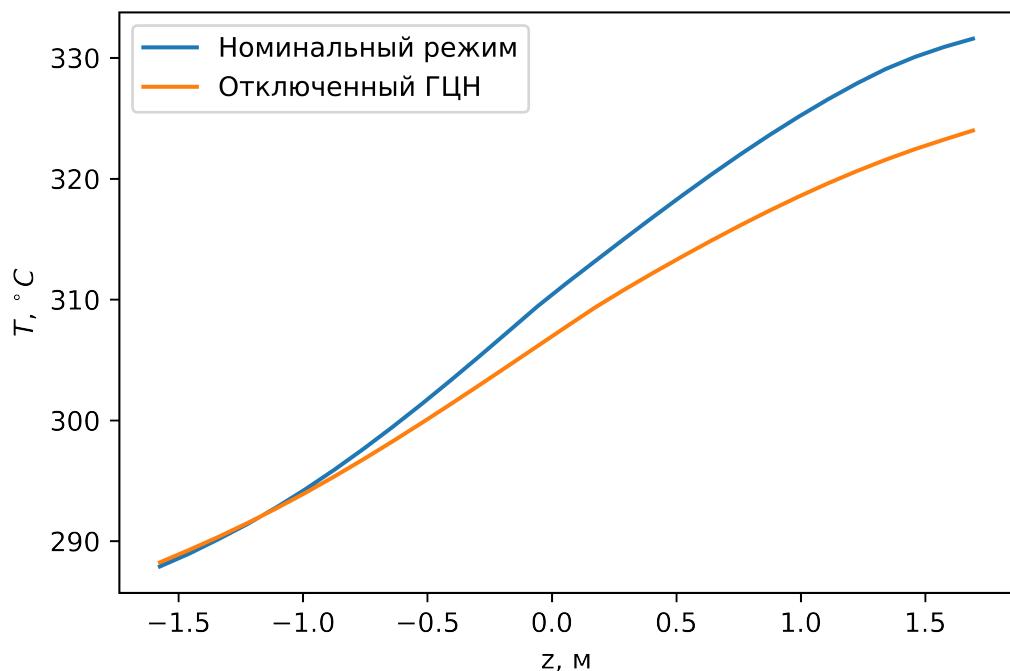


Рисунок 4.31. Распределение температуры теплоносителя по высоте АЗ усредненное по семи ТВС вокруг центральной

4.6. Расчет теплогидравлических характеристик при отключении двух ГЦН

Аналогично проведенному расчету характеристик РУ при отключении одного ГЦН также был проведен расчет в случае отключения двух ГЦН, стоящих друг на против друга.

В расчетной модели была пониженная температура на входе до $T_{\text{in}}^{\text{low}} = 284^\circ\text{C}$ для двух петель. Температура была снижена для ячеек, расположенных в левой верхней и правой нижней области по картограмме 4.22 при задании во входном файле T_IN.TXT расчетного модуля «ТРЕТОН». В файл Q6.TXT входное тепловыделение для всех ячеек было снижено до $50\%Q_{\text{ном}}$.

По результатам расчета получены максимальные значения температур топлива, оболочек и теплоносителя, которые представлены в таблице 4.5

Таблица 4.5: Максимальные температуры теплоносителя, топлива и оболочки твэлов при работе РУ на номинальной и повышенной мощности

Тепловая мощность, МВт	2903	1452
Максимальная температура теплоносителя, $^{\circ}\text{C}$	332.5	320.5
Запас до кипения теплоносителя, $^{\circ}\text{C}$	13.9	26
Максимальная температура топлива, $^{\circ}\text{C}$	1452	1067.8
Максимальная температура внешней оболочки	346.46	330
Максимальная температура внутренней оболочки	381.3	351.3
Запас до кипения теплоносителя вблизи оболоки	0.04	16.5

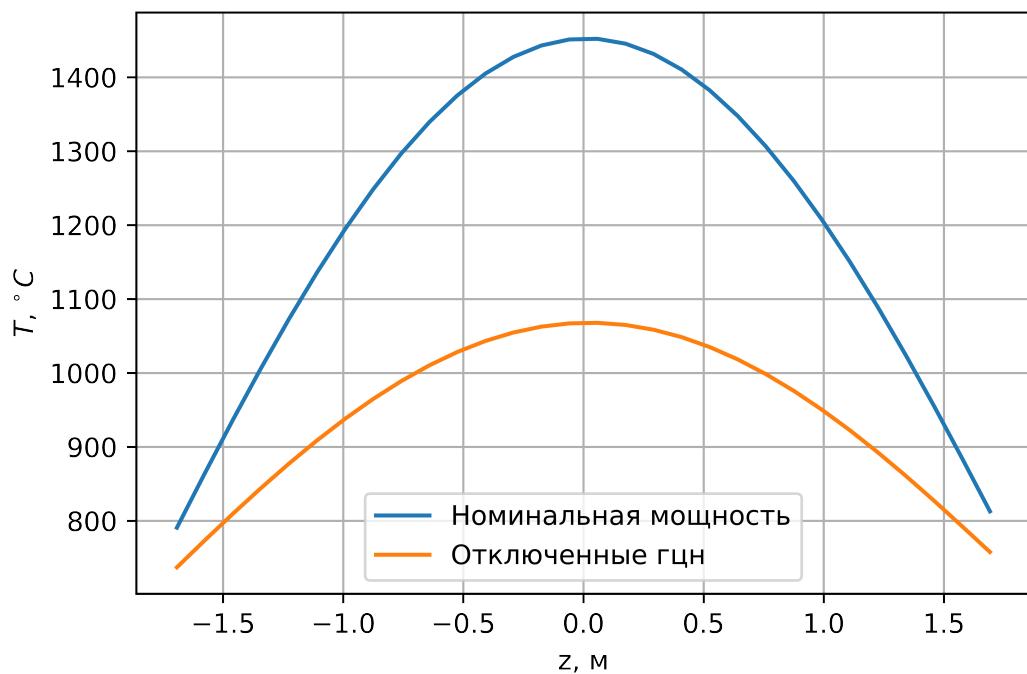


Рисунок 4.32. Распределение температуры топлива по высоте А3

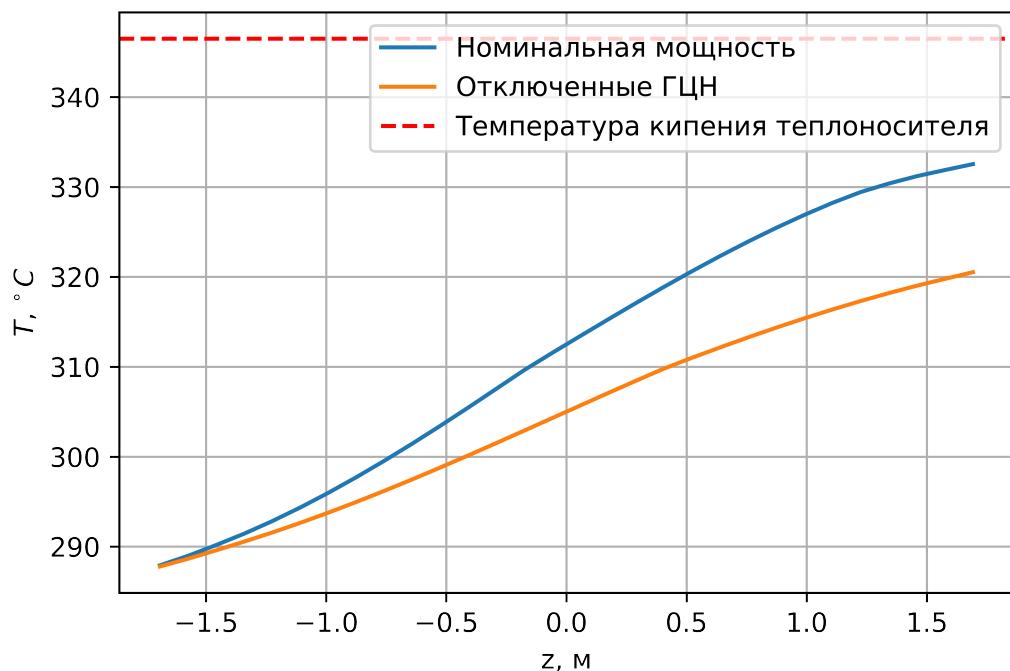


Рисунок 4.33. Распределение температуры теплоносителя по высоте АЗ

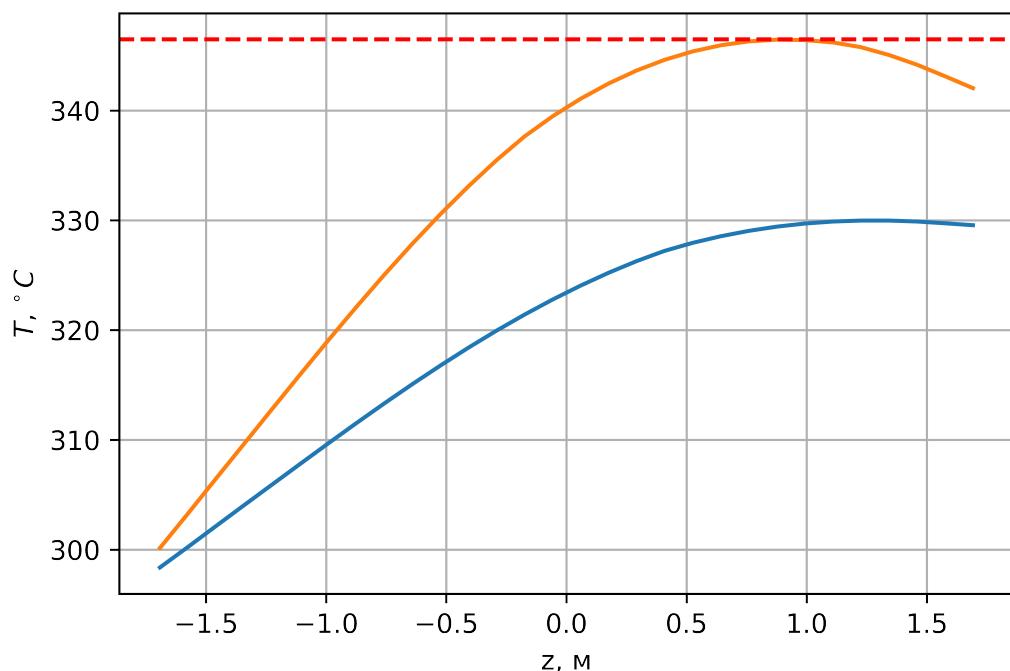


Рисунок 4.34. Распределение температуры наружных оболочек твэлов по высоте для кассеты с максимальной температурой теплоносителя

Общий график температур для работы реактора при работе на пониженной

мощности в следствие отключения двух ГЦН представлен на рисунке 4.35

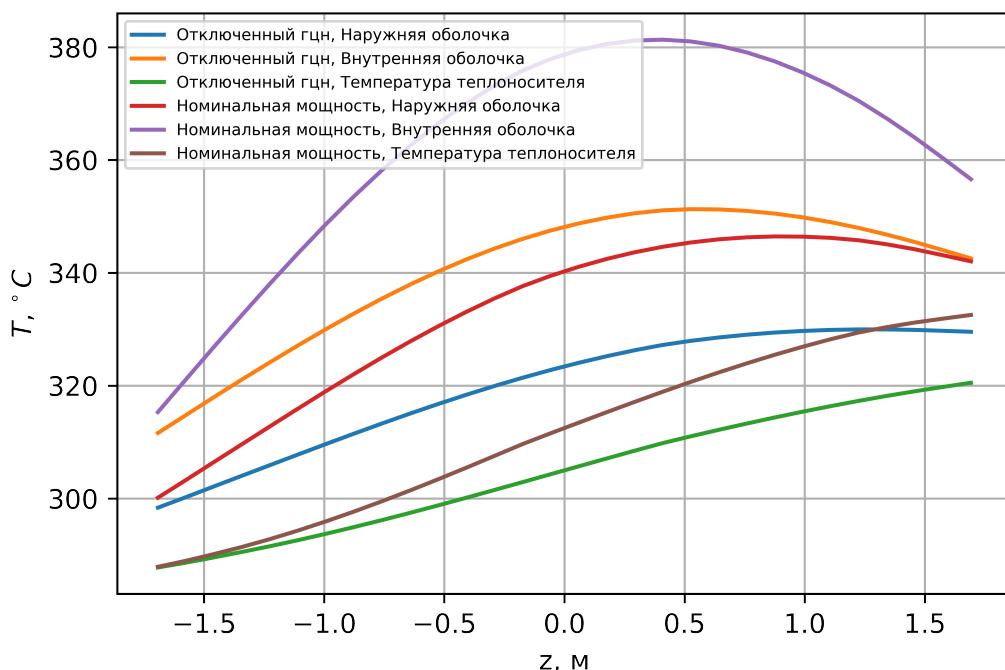


Рисунок 4.35. Распределение температур по высоте А3

На 4.36 видно, что при отключении двух ГЦН подогрев в центральной ТВС уменьшился на 12 градусов, средний по всем ТВС подогрев уменьшился на 9.3.

Для наблюдения возникающей при отключении неравномерности поля температур было построено распределение температуры теплоносителя на входе в активную зону и на выходе из нее. Соответствующие зависимости представлены на 4.38, 4.39. Из графиков можно определить установившиеся две температурные зоны в реакторе, возникшие в следствие захолаживания теплоносителя в петлях с отключенными ГЦН. Для оценки максимального эффекта от неравномерности энерговыделения было построено распределение температуры теплоносителя по высоте А3 для второй радиальной группы, соответствующей семи ТВС вокруг центрального. Распределение представлено на рисунке 4.40.

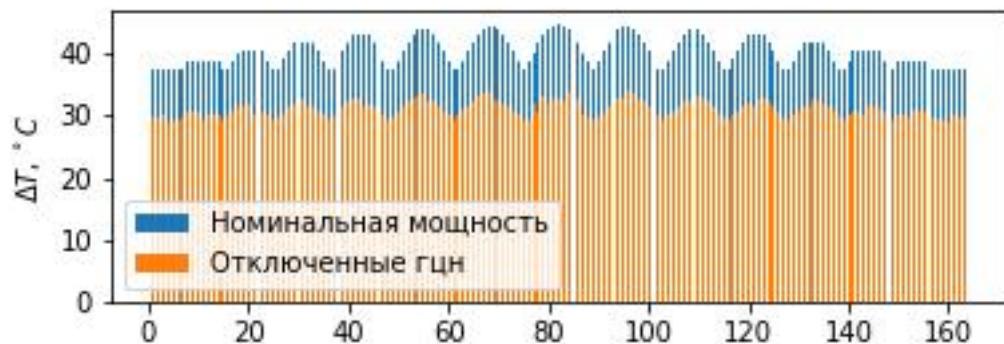


Рисунок 4.36. Распределение подогревов по всем ТВС

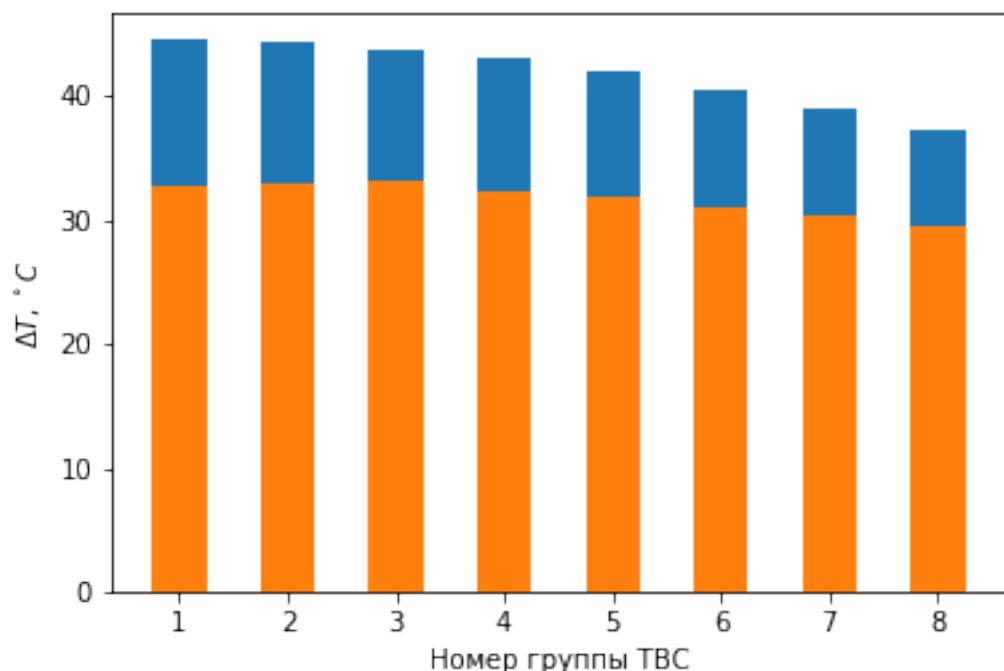


Рисунок 4.37. Распределение подогревов по радиальным группам ТВС

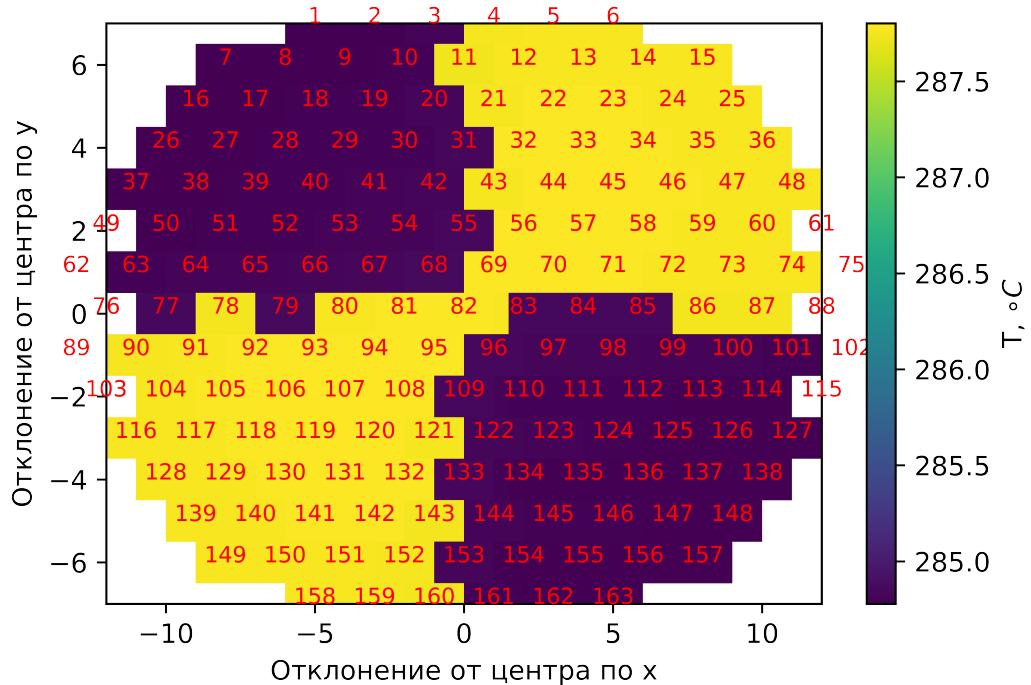


Рисунок 4.38. Распределение температуры теплоносителя по ТВС на входе в А3

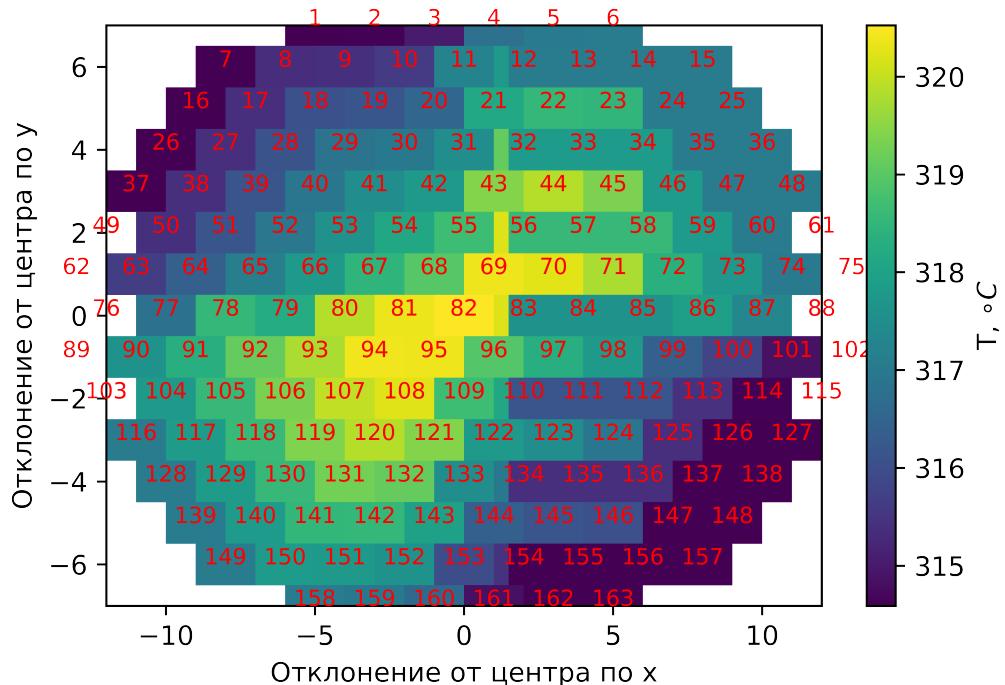


Рисунок 4.39. Распределение температуры теплоносителя по ТВС на выходе из А3

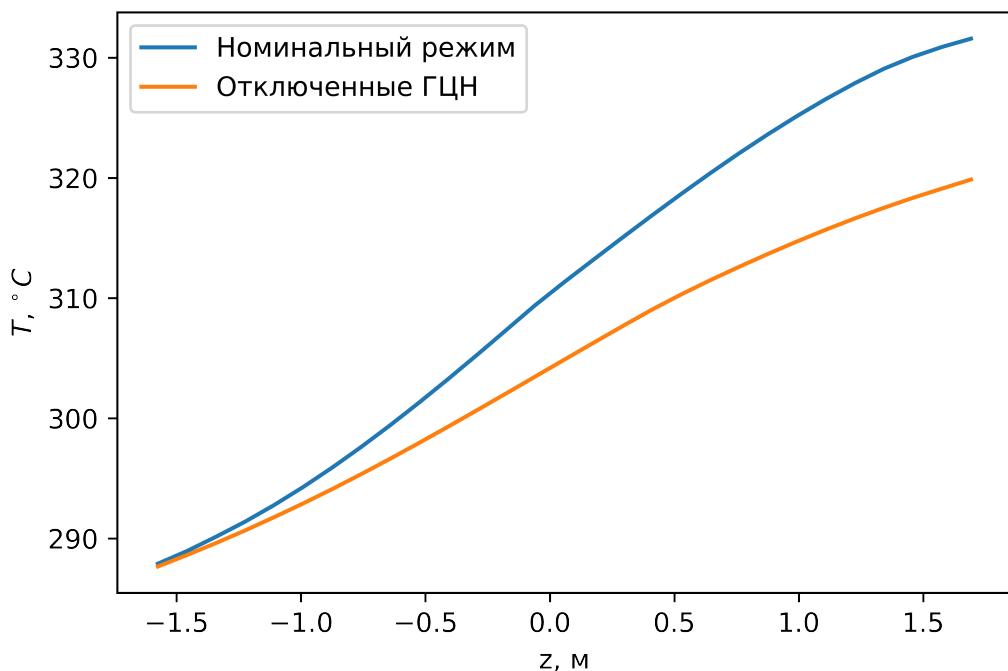


Рисунок 4.40. Распределение температуры теплоносителя по высоте АЗ усредненное по семи ТВС вокруг центральной

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проводилось исследование работы РУ ВВЭР-1000 на номинальной, повышенной мощностях, а также при отключении одного и двух ГЦН с помощью программного кода ТРЕТОН. По итогам были проанализированы поля температур соответствующих режимов, определены распределения основных теплогидравлических параметров.

Для номинального режима работы проведено сравнение с теоретическим расчетом, в результате которого можно сделать вывод о применимости данной расчетной модели для исследуемой установки.

Для работы реактора на повышенном уровне мощности была определена оптимальная в рамках используемой расчетной модели мощность в 105% от номинальной, для которой были проанализированы температуры оболочек, топлива и теплоносителя. Были получены максимальные значения топлива, оболочек и теплоносителя 1502, 347.9, 334, $^\circ\text{C}$ соответственно. По результату анализа можно сделать вывод о возможности повышения мощности для реактора ВВЭР-1000 на 5%, при которой температур насыщения не достигается за исключением возможного в рамках прогрешности расчетной модели программного комплекса ТРЕТОН пристеночного кипения в максимально нагруженных кассетах.

Для режимов с отключением ГЦН также проанализированы изменения теплогидравлических характеристик и перекосов полей температур. Для режима работы с одним отключенным ГЦН получены максимальные температуры топлива, оболочки и теплоносителя $1202, 335, 324.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ соответственно. Для режима с отключением двух гцн — $1068, 330, 321\text{ }^{\circ}\text{C}$ соответственно. По результатам анализа можно сделать вывод о возможности работы установки при отключении одного либо двух насосов.

Перечень использованных источников

1. Шутиков А. Эффективность повышения мощности энергоблоков АЭС с ВВЭР-1000: на примере Балаковской АЭС : дис. ... канд. / Шутиков А.В. — СГТУ, 2007.
2. Лескин С., Шелегов А., Слободчук В. Физические особенности и конструкция реактора ВВЭР-1000: [учебное пособие для вузов]. — М. : НИЯУ "МИФИ", 2011. — ISBN 9785726214924.
3. Физика и эксплуатационные режимы реактора ВВЭР-1000 / Б. В. И. [и др.]. — М. : НИЯУ МИФИ, 2014.
4. С.А. А., А.М. А., Б.Ю. Васильев. АЭС с реактором типа ВВЭР-1000. От физических основ эксплуатации до эволюции проекта. — М. : Логос, 2010.
5. Кириллов П. Справочник по теплогидравлическим расчетам в ядерной энергетике. — М. : ИздАТ, 2014.
6. Кириллов П., Богословская Г. Теплообмен в ядерных энергетических установках: Учебник для вузов. — М. : Энергоатомиздат, 2000.
7. Деев В., Круглов А., Ю.А.Маслов. Ядерные реакторы с водой сверхкритического давления (основы теплового расчета) / под ред. Д. В.И. — М. : НИЯУ МИФИ, 2015.
8. Михеев М., Михеева И. Основы теплопередачи. — М. : Энергия, 1977.
9. Маслов Ю., Меринов И., Рябов Н. Моделирование теплогидравлических процессов в реакторных установках и элементах теплообменного оборудования ЯЭУ. — М. : НИЯУ МИФИ, 2008. — С. 139—144.