

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО
ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»

Институт Ядерной Физики и Технологий

Кафедра № 5

«Теоретической и экспериментальной физики ядерных реакторов»

Пояснительная записка

к курсовому проекту на тему:

«Проектирование ЯЭУ для плавучей атомной электростанции»

Выполнил студент группы С14-105:	_____ Голов П.А.
Руководитель проекта:	_____ Щукин Н.В.
Консультант по теплофизическому расчету:	_____ Деев В.И.
Консультант по нейтронно-физическому расчету:	_____ Щукин Н.В.
Консультант по расчету биологической защиты:	_____ Терновых М.Ю.
Консультант по экономическому расчету:	_____ Гераскин Н.И.

Москва 2018 г.

Оглавление

Глава 2 Теплогидравлический расчет.....	3
2.1 Исходные данные.....	3
2.2 Расчет КПД АППУ и тепловой мощности реактора.....	9
2.3 Выбор дополнительных геометрических характеристик ТВС и активной зоны реактора.....	11
2.4 Выбор параметров теплоносителя 1-ого контура РУ.....	14
2.5 Расчет средних тепловых характеристик активной зоны РУ.....	15
2.6 Расчеты распределения температур по высоте ТВС с максимальным энерговыделением.	17
2.7 Оценка коэффициента запаса до кризиса теплообмена.....	21
2.8 Расчет гидравлических сопротивлений ТВС.....	23
Глава 3 Нейтронно-физический расчет	27
3.1 Формирование картограммы загрузки реактора.....	27
3.2 Подготовка макроскопических констант.....	32
3.3 Стационарный расчет реактора в начале кампании.....	36
3.4 Уточнение теплогидравлического расчета.....	40
3.5 Оценка кампании реактора при однократной загрузке топлива.....	42

Глава 2 Теплогидравлический расчет

2.1 Исходные данные.

Приведем исходные данные, заданные на начальной стадии проекта.

1. Компонировка АППУ:

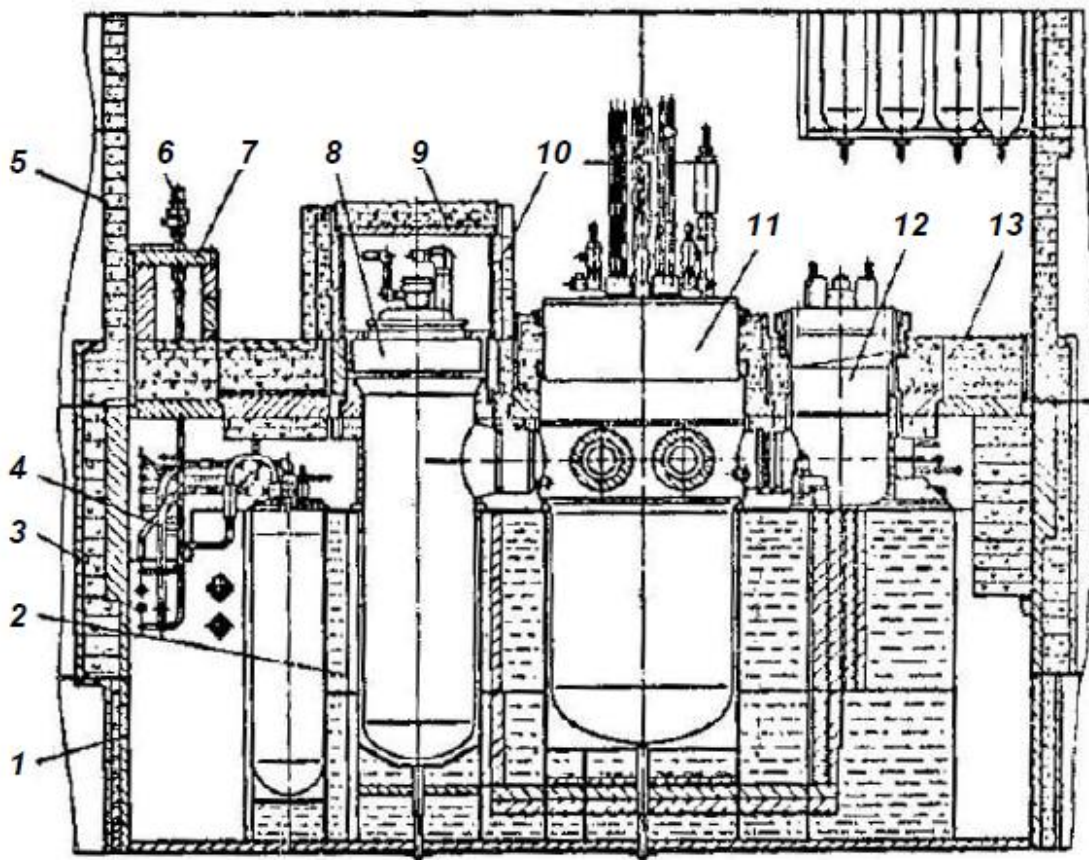


Рисунок 2.1 Блочная реакторная установка ПЭБ: 1 – защитная оболочка; 2 – бак железобетонной защиты; 3 – стальная периферийная биологическая защита; 4 – трубопроводы; 5 – бетонная периферийная биологическая защита; 6 – арматура; 7 – полносъёмная стальная выгородка; 8 – парогенератор; 9 – съёмная биологическая защита парогенераторов; 10 – стационарная биологическая защита парогенераторов; 11 – реактор; 12 – насосы первого контура; 13 – съёмная биологическая защита парогенераторов

2. Структурная тепловая схема РУ ПЭБ:

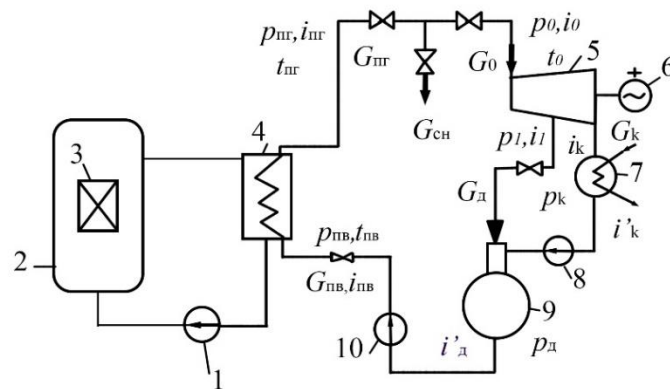


Рисунок. 2.2 Принципиальная тепловая схема РУ ПЭБ для ПЭБ: 1-ЦНПК; 2 - ПГБ; 3 – активная зона реактора; 4 – ПГ; 5 – паровая турбина; 6 – электрогенератор; 7 – конденсатор; 8 – конденсатный насос; 9 – деаэратор; 10 – питательный насос

3. Конструкция основной ТВС реактора:

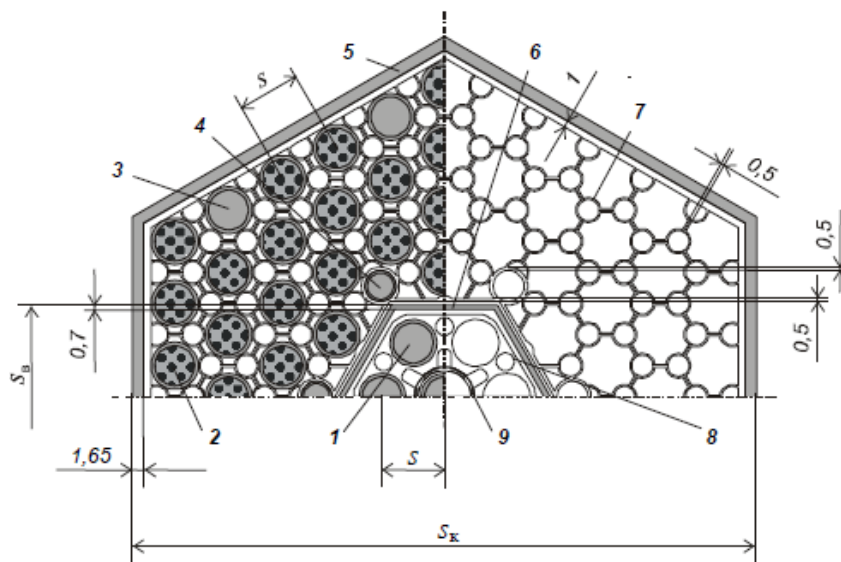


Рисунок 2.3 Конструкция основной ТВС реактора: 1 – пэл; 2 – твэл; 3- СВП большего диаметра; 4 – СВП меньшего диаметра; 5 – кожух; 6 – вытеснитель; 7 – дистанционирующая решетка; 8 – дистанционирующая пластина пэлов; 9 – центральная трубка

4. Принципиальная конструктивная схема реактора:

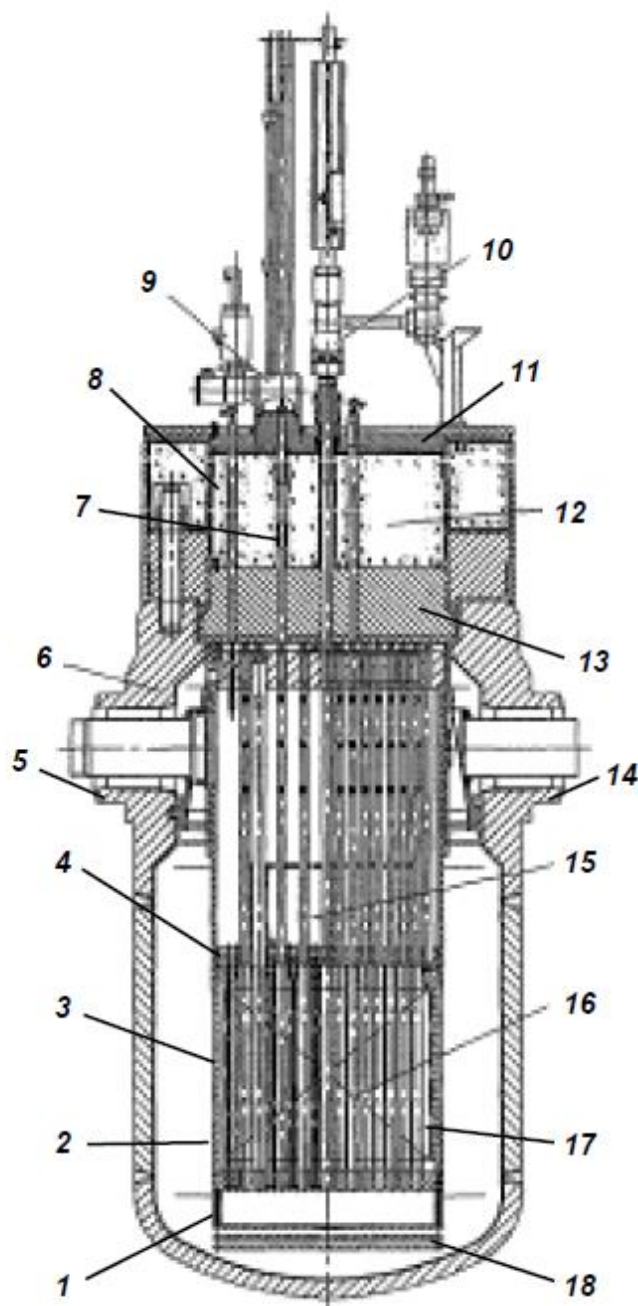


Рисунок 2.4 Реактор КЛТ-40С: 1 – щелевой фильтр; 2 – обечайка; 3 – пэл; 4 – РО КГ; 5 – патрубок парогенератора; 6 – корпус; 7 – стержни АЗ; 8 – биологическая защита; 9 – привод ИМ; 10 – привод ИМ КГ; 11 – верхняя плита; 12 – крышка; 13 – силовая плита; 14 – патрубок ЦНПК; 15 – выемной блок; 16 – активная зона; 17 - ТВС; 18 – донные экраны

5. Конструкция ТВС реактора:

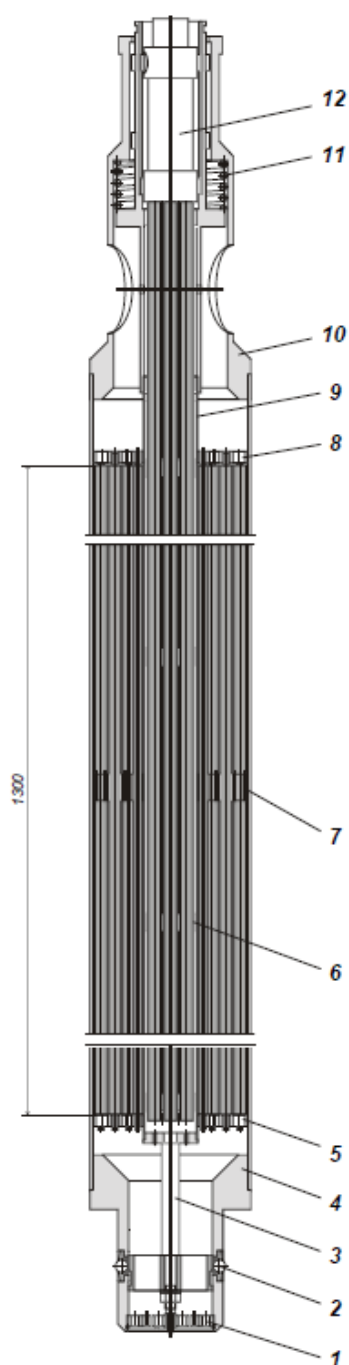


Рисунок 2.5 Конструкция ТВС реактора КЛТ-40С: 1 – дроссельная заслонка; 2 – шариковый замок; 3 – шток шарикового замка; 4 – хвостовик; 5 – нижняя опорная решетка; 6 – обойма пэлов; 7 – дистанционирующая решетка; 8 – верхняя решетка; 9 – вытеснитель; 10 – головка; 11 – пружина вытеснителя; 12 – РО КГ

6. Общие технические характеристики ПАТЭС:

Таблица 2.1 - Общие технические характеристики проектируемой ПАТЭС

Характеристика	Значение
Установленная электрическая мощность $Q_{э}$, МВт	35
Установленная тепловая мощность $Q_{т}$ системы теплоснабжения, Гкал/ч	25
Тип реактора	КЛТ-40С
Давление воды $p_{1к}$ в первом контуре РУ, МПа	12,7
Температура воды $t_{вых.р}$ на выходе из реактора, °С	316
Тип турбины	Конденсационная
Давление пара p_0 на входе в турбину, МПа	3,43
Температура воды t_0 на входе в турбину, °С	285
Число отборов пара	1
Давление пара p_1 в первом отборе, МПа	0,9
Давление p_k в конденсаторе, Мпа	0,005
Давление p_d в деаэраторе, Мпа	0,115
Давление питательной воды $p_{п.в.}$, МПа	6
Температура питательной воды $t_{п.в.}$, °С	170
Кампания активной зоны, лет	2,5 - 3

7. Основные технические характеристики ТВС активной зоны:

Таблица 2.2 – Основные технические характеристики ТВС активной зоны

Характеристика	Значение
Тип и форма ТВС	Чехловая с вытеснителем
Толщина шестигранного чехла ТВС δ_k , мм	1,65

Материал шестигранного чехла	Э-110
Тип дистанционирующей решетки	Сотовая
Форма вытеснителя	Шестигранная
Толщина чехла вытеснителя δ_v , мм	0,7
Материал чехла	Э-110
Диаметр центральной трубки $d_{ц.тр}$, мм	8,6
Толщина стенки $\delta_{ц.тр}$, мм	0,5
Материал трубки	Э-110
Тип ТВЭЛОВ	Дисперсионный
Состав топливного сердечника	UO ₂ + PuO ₂
Обогащение по Pu-239, %	52
Обогащение по Pu-240, %	24
Обогащение по Pu-241, %	15
Диаметр ТВЭЛА $d_{ТВЭЛ}$, мм	6,8
Длина активной части ТВЭЛА $H_{а.з}$, мм	1300
Максимально допустимая температура топлива $t_T^{доп}$, °С	600
Толщина оболочки ТВЭЛА $\delta_{об}$, мм	0,5
Материал оболочки ТВЭЛА	Э-110
Максимально допустимая температура наружной поверхности оболочки $t_{об}^{доп}$, °С	334
Эквивалентный диаметр компенсатора распухания $d_{комп}$, мм	2,52
Толщина стенки компенсатора распухания $\delta_{комп}$, мм	0,15
Материал компенсатора	Э-110
Диаметр дистанционирующей проволоки $d_{д.пр}$, мм	0,45
Материал проволоки	Э-110
Диаметр дистанционирующей спирали $d_{д.сп}$, мм	1,1
Количество ТВЭЛОВ $n_{ТВЭЛ}$, штук	69

Количество СВП $\varnothing 6,8$ мм $n_{\text{СВП1}}$, штук	9
Количество СВП $\varnothing 4,5$ мм $n_{\text{СВП2}}$, штук	6
Толщина оболочки СВП $\delta_{\text{об.СВП}}$, мм	0,5
Материал оболочки СВП	Э-110
Выгорающий поглотитель	Gd_2O_3
Диаметр пэла $d_{\text{пэл}}$, мм	6,8
Количество пэлов в кластере вытеснителя, штук	7
Толщина оболочки пэла $\delta_{\text{об.пэл}}$, мм	0,5
Материал оболочки пэла	Э-110
Поглотитель	B_4C

2.2 Расчет КПД АППУ и тепловой мощности реактора.

В дополнение к характеристикам, указанным в пункте 2.1, необходимо задать следующие значения:

Таблица 2.3 – Дополнительные характеристики для расчета КПД АППУ

Характеристика	Значение
Удельная энтальпия на входе в турбину i_0 , МДж/кг	2,94
Удельная энтропия на входе в турбину s_0 , Дж/(кг·К)	6388,70
Температура на выходе из конденсатора t_k , °С	32,88
Удельная энтальпия воды при температуре свежего пара на выходе из конденсатора i'_k , МДж/кг	0,14
Удельная энтропия воды при температуре свежего пара на выходе из конденсатора s'_k , Дж/(кг·К)	476,25
Удельная энтальпия питательной воды $i_{\text{пв}}$, МДж/кг	0,72
Удельная энтропия питательной воды $s_{\text{пв}}$, Дж/(кг·К)	2035,30
КПД использования тепла $\eta_{\text{ит}}$	0,98
Внутренний относительный КПД турбины η_{0i}	0,75

Механический КПД η_m	0,97
КПД электрогенератора $\eta_{ЭГ}$	0,98

Расчет КПД РУ КЛТ-40С производился по циклу Ренкина.

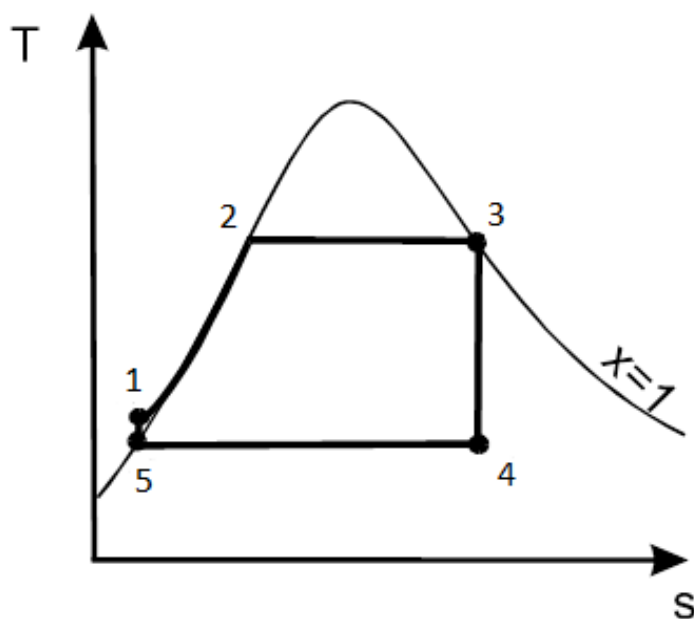


Рисунок 2.6 Цикл Ренкина

Рассмотрим процессы, изображенные на рисунке 2.6:

1-2: подогрев до температуры насыщения; 2-3: испарение при давлении p_0 ; 3-4: работа в турбине; 4-5: конденсация отработавшего пара; 5-1: повышение давления питательными насосами от p_k до p_0 .

Термический КПД цикла Ренкина без регенерации:

$$\eta_t^0 = 1 - T_k \frac{s_0 - s'_k}{i_0 - i'_k} \quad (2.2.1)$$

Термический КПД цикла Ренкина при идеальной регенерации:

$$\eta_t^\infty = 1 - T_k \frac{s_0 - s_{пв}}{i_0 - i_{пв}} \quad (2.2.2)$$

Термический КПД с n регенеративными отборами. Примем $n = 1$.

$$\eta_{tn} = \eta_t^0 + \frac{n}{1+n} (\eta_t^\infty - \eta_t^0) \quad (2.2.3)$$

КПД брутто для всех типов установок:

$$\eta_{\text{брутто}} = \eta_{\text{ЭГ}} \eta_{\text{м}} \eta_{\text{Ои}} \eta_{tn} \eta_{\text{ит}} \quad (2.2.4)$$

Тепловая мощность реактора:

$$Q_p = \frac{W_{\text{эл}}}{\eta_{\text{брутто}}} \quad (2.2.5)$$

Результаты расчета представлены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Результаты расчета КПД АППУ и тепловой мощности реактора

Характеристика	Значение
Термический КПД с n регенеративными отборами η_{tn}	0.38
КПД брутто $\eta_{\text{брутто}}$	0.26
Тепловая мощность одного реактора Q_p ПЭБ, МВт	132.8

2.3 Выбор дополнительных геометрических характеристик ТВС и активной зоны реактора.

Исходя из конструкции ТВС, водно-топливного отношения и учитывая количество и размер располагаемых в ней элементов, определим шаг между стержнями $s = 9,6$ мм.

Относительный шаг:

$$x = \frac{s}{d_{\text{ТВЭЛа}}} \quad (2.3.1)$$

Исходя из соображений компоновки (рисунок 2.7), зададим количество ТВС активной зоны РУ:

$$N_{\text{ТВС}} = 121 \quad (2.3.2)$$

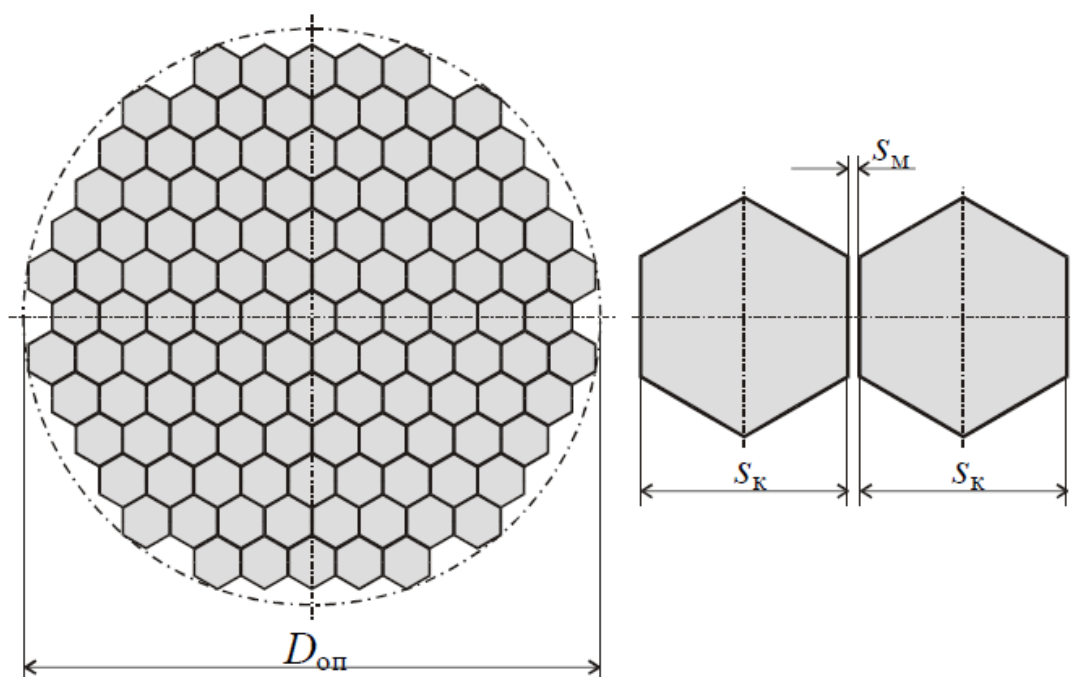


Рисунок 2.7 Компоновка ТВС в активной зоне РУ

Определим эквивалентный диаметр активной зоны:

$$D_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{2\sqrt{3}}{\pi} N_{\text{ТВС}} \cdot (s_K + s_M)} \quad (2.3.3)$$

Результаты расчета дополнительных характеристик ТВС и активной зоны представлены в таблице 2.5 и таблице 2.6.

Таблица 2.5 – Дополнительные геометрические характеристики ТВС

Характеристика	Значение
Шаг между стержнями в ТВС s , мм	9,6
Относительный шаг решетки x	1,411
Эквивалентный диаметр ячейки в бесконечной решетке $d_{\text{экв}}$, мм	8,14
Размер чехла кассеты под ключ S_K , мм	96
Площадь поперечного сечения кассеты S_K , мм ²	7988
Размер вытеснителя под ключ S_B , мм	28,2
Площадь поперечного сечения вытеснителя S_B , мм ²	689
Проходное сечение для теплоносителя в пучке ТВЭЛОВ и СВП $S_{\text{ТН}}$, мм ²	3831
Смоченный периметр P_r , мм	2170
Гидравлический диаметр d_r , мм	7,06
Обогреваемый периметр P_T , мм	1474
Тепловой диаметр d_T , мм	10,4
Поверхность теплообмена $F_{\text{ТО}}$, м ²	1,916

Таблица 2.6 – Дополнительные геометрические характеристики активной зоны

Характеристика	Значение
Количество ТВС $N_{\text{твс}}$, шт.	121
Межкассетные промежутки s_m , мм	2
Описанный диаметр активной зоны $D_{\text{он}}$, мм	1200
Эквивалентный диаметр $D_{\text{экв}}$, мм	1132
Объем активной зоны $V_{\text{а.з.}}$ (эквивалентный), м ³	1,309

2.4 Выбор параметров теплоносителя 1-ого контура РУ.

Необходимо определить среднюю скорость $w_{\text{ср}}$ движения теплоносителя в 1-ом контуре РУ (в пучках ТВЭЛов и СВП). В реакторах с водяным теплоносителем эта величина составляет $2,5 \div 3,5 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Выберем $w_{\text{ср}} = 3,2 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

Зная скорость движения теплоносителя, можно определить расход теплоносителя в активной зоне:

$$w_{\text{ср}} = \frac{k_G G_p}{\rho S_{\text{Т.Н.}}} N_{\text{ТВС}} \quad (2.4.1)$$

где ρ – плотность теплоносителя при средней по высоте активной зоны температуре воды.

Далее можно найти расход теплоносителя на охлаждение ТВЭЛов и СВП одной ТВС без учета прохождения воды внутрь кожухов вытеснителя и через межкассетные зазоры:

$$G_{\text{Т.Н.}} = \frac{k_G G_p}{N_{\text{ТВС}}} \quad (2.4.2)$$

Подогрев теплоносителя в реакторе Δt_p можно определить, зная расход теплоносителя в активной зоне РУ и тепловую мощность реактора:

$$\Delta t_p = \frac{Q_p}{c_p G_p} \quad (2.4.3)$$

Зная подогрев теплоносителя и температуру на выходе из реактора, находим температуру на входе в реактор:

$$t_{\text{вх.р.}} = t_{\text{вых.р.}} - \Delta t_p \quad (2.4.4)$$

В итоге получаем параметры теплоносителя 1-ого контура реакторной установки. Коэффициент k_G был взят равным 0,93.

Результаты расчета представлены в таблице 2.7.

Таблица 2.6 - Данные для расчета параметров теплоносителя 1-ого контура РУ

Характеристика	Значение
Давление воды 1-ого контура p , МПа	12,7
Температура воды на выходе из реактора $t_{\text{вых.р.}}$, °С	316
Средняя скорость воды в пучках ТВЭЛов и СВП $w_{\text{ср}}$, м/с	3,2

Таблица 2.7 – Результаты расчета параметров теплоносителя 1-ого контура РУ

Характеристика	Значение
Полный расход теплоносителя через реактор G_p , кг/с	1129
Средний расход теплоносителя на охлаждение ТВЭЛов и СВП одной ТВС $G_{\text{т.н.}}$, кг/с	8,68
Подогрев воды в реакторе Δt_p , °С	20.32
Температура воды на входе в реактор $t_{\text{вх.р.}}$, °С	295.7

2.5 Расчет средних тепловых характеристик активной зоны РУ.

Рассчитаем средние тепловые характеристики на основе полученных выше данных.

Удельная энергонапряженность активной зоны:

$$q_v = \frac{Q_p}{V_{\text{а.з.}}} \quad (2.5.1)$$

Средняя тепловая мощность ТВС (учитываем только мощность, выделяемую в ТВЭЛАх):

$$Q_{\text{ТВС}} = \frac{k_Q Q_p}{n_{\text{ТВС}}} \quad (2.5.2)$$

где k_Q - коэффициент (меньше единицы), учитывающий тот факт, что мощность, выделяемая в ТВЭлах, немного меньше полной тепловой мощности реактора, так как часть тепла выделяется в воде и конструкционных материалах.

Средний линейный тепловой поток от ТВЭлов (на единицу ТВЭла):

$$q_{\text{лср}} = \frac{Q_{\text{ТВС}}}{n_{\text{ТВЭЛ}} H_{\text{а.з.}}} \quad (2.5.3)$$

Средняя плотность теплового потока на поверхности ТВЭлов:

$$q_{\text{ср}} = \frac{Q_{\text{ТВС}}}{F_{\text{ТО}}} = \frac{q_{\text{лср}}}{\pi d_{\text{ТВЭЛ}}} \quad (2.5.4)$$

Полученные значения представлены в таблице 2.8.

Таблица 2.8 – Результаты расчета тепловых характеристик активной зоны РУ

Параметр	Значение
Удельная энергонапряженность активной зоны q_v , МВт/м ³	101.5
Средняя тепловая мощность ТВС $Q_{\text{ТВС}}$, МВ	1.076
Средний линейный тепловой поток от одного ТВЭла $q_{\text{лср}}$, Вт/см	119.907
Средняя плотность теплового потока на поверхности ТВЭлов $q_{\text{ср}}$, МВт/м ²	0.561

Расчеты проведены при $k_Q = 0,98$.

2.6 Расчеты распределения температур по высоте ТВС с максимальным энерговыделением.

Зададим коэффициенты неравномерности $k_r = 1,42$ и $k_z = 1,36$, отсюда $k_v = k_r k_z = 1,93$. Зная коэффициенты неравномерности, найдем эффективные добавки: $\Delta_r = 0.272$ м, $\Delta_z = 0.126$ м.

Используем гидравлическое профилирование для того, чтобы подогрев теплоносителя ТВСМ был равен среднему значению подогрева воды в реакторе. При этом, расход и скорость воды в ТВСМ принимаются в k_r раз больше средних значений.

Найдем изменение плотности теплового потока на поверхности максимально нагруженного (центрального) твэла по координате z по уравнению:

$$q(z) = q_{max} \cos\left[\frac{\pi}{2} \left(\frac{H_{a.з.} - 2z}{H_{a.з.} + 2\Delta_z} \right)\right] \quad (2.6.1)$$

где $q_{max} = k_v q_{ср}$. Результаты отражены на рисунке 2.8.

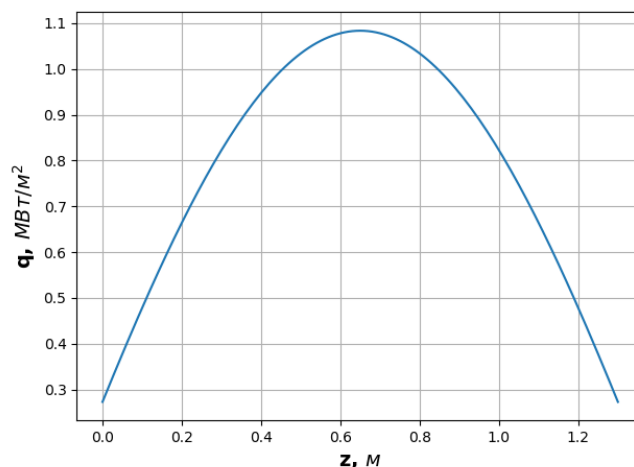


Рисунок 2.8 Изменение плотности теплового потока на поверхности центрального максимально нагруженного твэла по высоте ТВСМ

Расчет распределений температур по высоте ТВСМ для воды, оболочки твэла и сердечника твэла проведен по формулам из пособия “Основы расчета судовых ЯЭУ” п. 4.2. Расчеты проведены при $\lambda_{\text{топ}} = 35 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$, $\lambda_{\text{об}} = 18 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$.

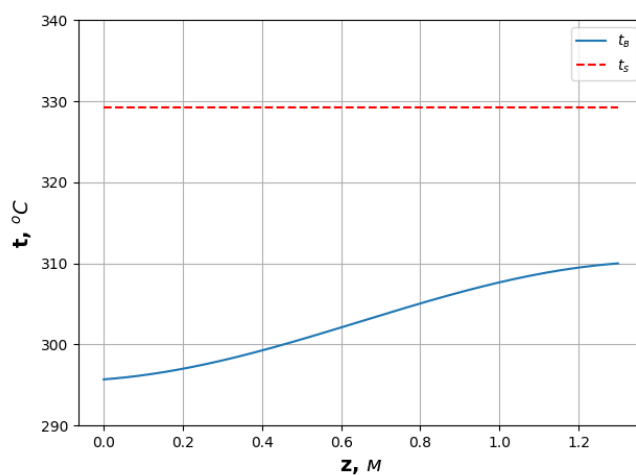


Рисунок 2.9 Распределение температуры воды по высоте ТВСМ

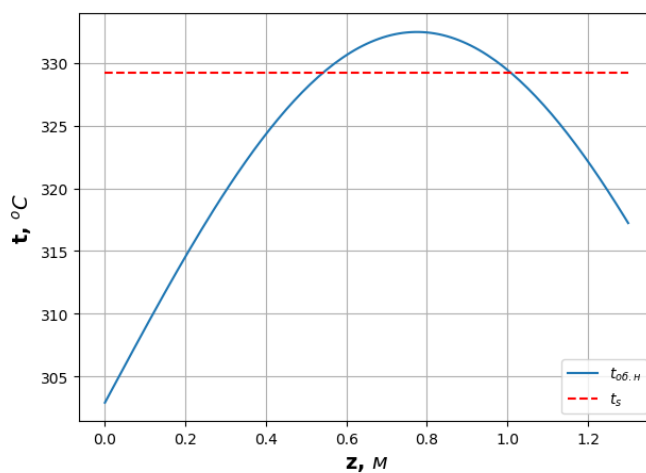


Рисунок 2.9 Распределение температуры внешней оболочки твэла по высоте ТВСМ

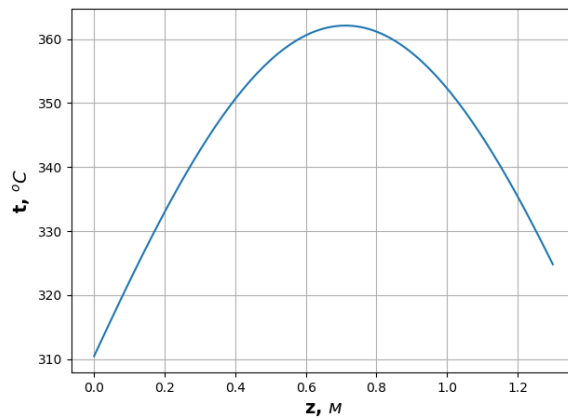


Рисунок 2.10 Распределение температуры внутренней оболочки ТВЭЛ по высоте ТВСМ

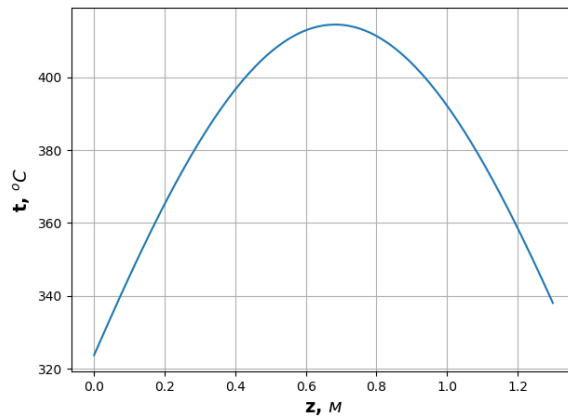


Рисунок 2.11 Распределение температуры топливного сердечника по высоте ТВСМ при $\lambda_{\text{топ}} = 35 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$

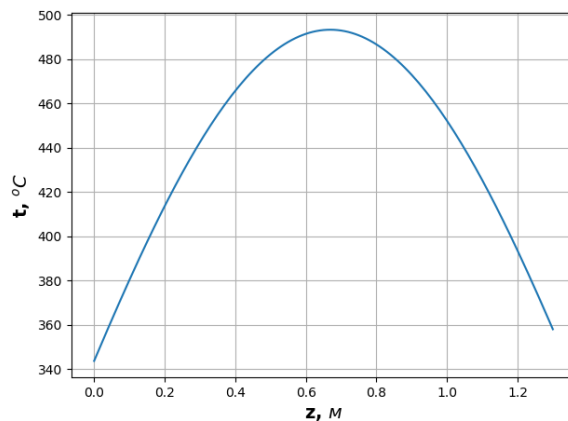


Рисунок 2.12 Распределение температуры топливного сердечника по высоте ТВСМ при $\lambda_{\text{топ}} = 14 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$

Таблица 2.9 - Основные теплогидравлические характеристики ТВСМ

Характеристика	Значение
Тепловая мощность $Q_{\text{ТВСМ}}$, МВт	1,528
Удельная энергонапряженность $q_{v \max}$, МВт/м ³	144,060
Средний линейный тепловой поток $q_{\text{лср}}$, Вт/см	170,272
Средняя плотность теплового потока $q_{\text{ср}}$, МВт/м ²	0,793
Максимальная плотность теплового потока q_{\max} , МВт/м ²	1,083
Расход воды на охлаждение твэлов и СВП $G_{\text{ТН}}$, кг/с	12,326
Средняя скорость воды в пучке твэлов и СВП $w_{\text{ТВСМ}}$, м/с	4,544
Средняя массовая скорость $(\rho w)_{\text{ТВСМ}}$, кг/(м ² · с)	3217
Максимальная температура наружной поверхности оболочки $t_{\text{об.н.}}$, °С	332,476
Максимальная температура внутренней поверхности оболочки $t_{\text{об.вн.}}$, °С	362,091
Максимальная температура топлива $t_{\text{топ}}$ при $\lambda_{\text{топ}} = 35$ Вт/(м·К), °С	414,492
Максимальная температура топлива $t_{\text{топ}}$ при $\lambda_{\text{топ}} = 14$ Вт/(м·К), °С	493,324

Из расчетов видно, что максимальная температура наружной оболочки твэла составляет 332,5°С, что ниже допустимого проектного предела (334 °С). Максимальная температура топливного сердечника в начале работы реактора составляет 414,5 °С, а, с учетом уменьшения коэффициента теплопроводности при высокой глубине выгорания топлива, составляет 493,3°С. В обоих случаях температура топливного сердечника ниже проектного предела.

На графике распределения температуры внешней оболочки твэла по высоте видно, что присутствует область, в которой температура внешней оболочки твэла выше температуры насыщения воды при давлении $p =$

12,7 МПа. Длина этого участка составляет 0,45 м. Недогрев потока воды до температуры насыщения на данном участке, за исключением узкой зоны длиной $L_{п.кип.} = 0,05$ м, достаточно велик, и, как показывают расчеты, поверхностное кипение там маловероятно. Поверхностное кипение на участке $L_{п.кип.}$ может привести только к весьма небольшому снижению температуры наружной поверхности оболочки твэла (примерно 0,078 °С).

2.7 Оценка коэффициента запаса до кризиса теплообмена.

Используем табличный метод определения критического теплового потока. Рассчитаем поправки к табличному критическому тепловому потоку.

K_1 – учитывает отличие теплового диаметра d_T стандартной ячейки от базового значения 9,36 мм;

K_2 – учитывает относительный шаг расположения стержней;

K_3 – учитывает влияние на КТП входных условий сборки;

K_4 – учитывает турбулизирующее взаимодействие на кризис кипения решеток.

$$K = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \quad (2.7.1)$$

Результаты расчета приведены в таблице 2.10.

Таблица 2.10 – Поправочные коэффициенты к табличным данным КТП

K_1	K_2	K_3	K_4	К
1,049	1,004	1,121	1,156	1,365

Используя таблицу критического теплового потока при кипении воды в сборках твэлов с треугольной упаковкой найдем табличные значения $q_{кр}$ методом линейной интерполяции при давлении 12.7 Мпа и массовой скорости

$\rho w = 3217 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}$, а также вычислим значение критического потока с учетом поправок.

Таблица 2.11 - Табличные значения КТП

X	-0.2	-0.2	0	0.1	0.2
$q_{\text{кр}}, \text{МВт/м}^2$	4,731	3,416	2,503	1,829	1,262
$q_{\text{кр}} \cdot K,$ МВт/м^2	6,458	4,663	3,416	2,496	1,723

Оценим коэффициент запаса до кризиса теплообмена методом касательной. Для этого, рассчитаем зависимость $q(x)$ при увеличении нагрузки в n раз. Число n выбирается так, чтобы график зависимости $q(x)$ и $q_{\text{кр}}(x)$ пересеклись в одной точке с учетом отклонения $q_{\text{кр}}$ от рассчитанных данных. Отклонение от расчетных данных:

$$q_{\text{кр.откл.}} = q_{\text{кр}}(1 \pm 3\sigma_{\text{кв}}) \quad (2.7.2)$$

где $\sigma_{\text{кв}} = 0,15$.

Таблица 2.12 - Значения относительной энтальпии воды и теплового потока на поверхности максимально нагруженных ТВЭЛов в различных сечениях ТВСМ

z, м		0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,3
$N_{\text{НОМ}}$	X	-0,171	-0,162	-0,146	-0,125	-0,104	-0,086	-0,073	-0,069
	q, МВт/м^2	0,273	0,664	0,947	1,078	1,034	0,822	0,478	0,273
$2,0N_{\text{НОМ}}$	X	-0,171	-0,152	-0,120	-0,080	-0,037	0,002	0,026	0,033
	q, МВт/м^2	0,545	1,328	1,895	2,156	2,068	1,645	0,956	0,545

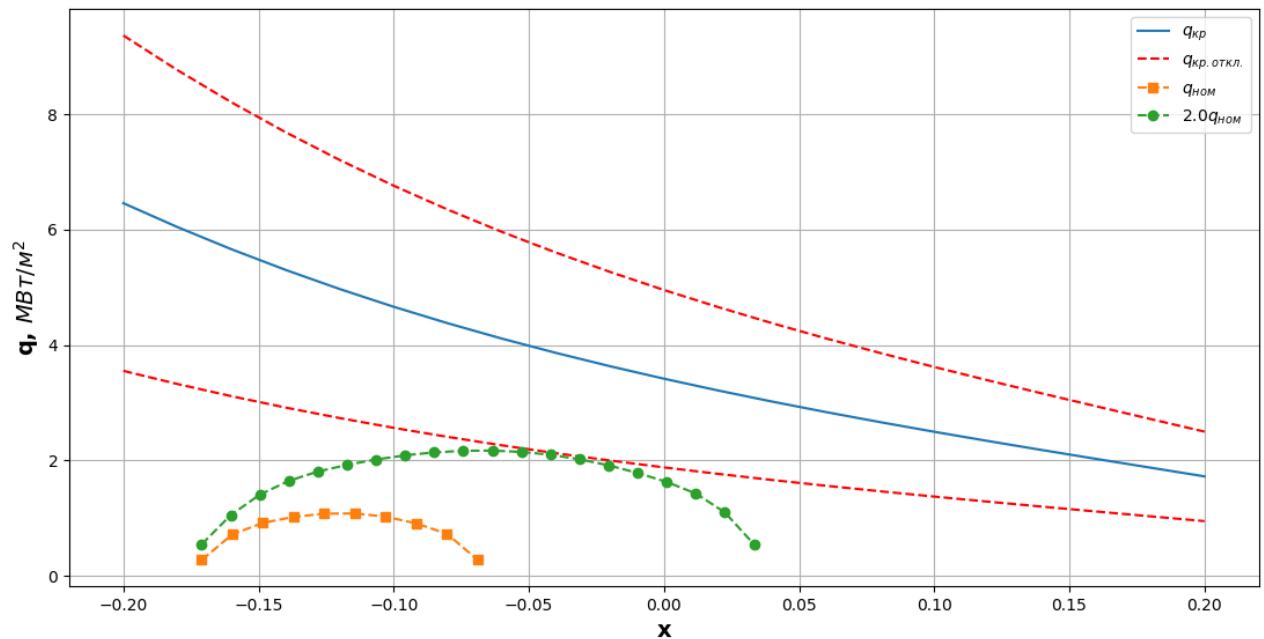


Рисунок 2.13 Определение запаса до кризиса теплообмена

Был построен график для определения запаса до кризиса теплообмена. Из графика видно, что в точках $x_{кр} = -0,04$ и $q_{кр} = 2,1 \frac{\text{МВт}}{\text{м}^2}$ есть вероятность возникновения кризиса теплообмена, который может произойти в сечении ТВСМ на расстоянии $z_{кр} \approx 0,7$ м.

В итоге можно сделать вывод, что на этапе предварительного теплового расчета критическая мощность ТВСМ составляет:

$$N_{кр} = 2,0N_{ном} = 3,1 \text{ МВт} \quad (2.7.3)$$

а коэффициент запаса до кризиса теплообмена:

$$K_{зап} = \frac{N_{кр}}{N_{ном}} = 2,0. \quad (2.7.4)$$

2.8 Расчет гидравлических сопротивлений ТВС.

Расчет гидравлических сопротивлений проведем, используя конструкцию ТВС, показанную на рисунке 2.5.

Полная потеря давления при движении теплоносителя в каналах активной зоны реактора:

$$\Delta p = \Delta p_{\text{тр}} + \Sigma \Delta p_{\text{м}} \pm \Delta p_{\text{уск}} \pm \Delta p_{\text{нив}} \quad (2.8.1)$$

где $\Delta p_{\text{тр}}$ – сопротивление трения, $\Delta p_{\text{м}}$ – местные сопротивления, $\Delta p_{\text{уск}}$ – сопротивления, связанные с ускорением потока, $\Delta p_{\text{нив}}$ – нивелированный, гидростатический напор. В нормальных условиях эксплуатации реакторов с водой под давлением последние две составляющие малы по сравнению с первыми двумя членами, поэтому в расчете мы ими пренебрегаем.

Для того, чтобы обеспечить одинаковый подогрев теплоносителя в каналах реактора расход воды на охлаждение центральных ТВС должен быть больше, чем на охлаждение ТВС периферийной группы. В реакторах с гидравлическим профилированием такой эффект достигается распределением расхода теплоносителя по радиусу активной зоны при помощи специальных органов регулирования расхода (шайбы или дроссельные заслонки), устанавливаемых на входе ТВС.

Рассчитаем гидравлические сопротивления, основываясь на характеристиках, полученных для ТВСМ, в которой расход теплоносителя максимален, а дроссельные заслонки открыты так, что их сопротивление минимально.

Рассчитаем сопротивление трения в пучке твэлов и СВП ТВСМ:

$$\Delta p_{\text{тр}} = \xi \frac{L \rho w_{\text{ср}}^2}{2d_{\text{г}}} \quad (2.8.2)$$

где ξ – коэффициент сопротивления трения.

Таблица 2.13 - Сопротивление трения в пучке твэлов и СВП в ТВСМ

w , м/с	Re	ξ_0	ξ	$\Delta p_{тр}$, кПа
4,544	$3,07 \cdot 10^5$	0,014	0,017	19,67

Рассчитаем местные сопротивления. При расчете необходимо учесть:

$\zeta_{вх}$ – сопротивление входных участков сборки;

$\zeta_{вых}$ – сопротивление выходных участков сборки;

$\zeta_{н.р.}$ – сопротивление нижней опорной решетки стержней;

$\zeta_{в.р.}$ – сопротивление верхней опорной решетки стержней;

$\zeta_{др}$ – сопротивление дистанционирующих решеток;

ζ_d – сопротивление дроссельной заслонки;

Так как мы рассматриваем канал, в котором расход теплоносителя максимален, принимаем сопротивление дроссельной заслонки $\zeta_d = 0$. Количество дистанционирующих решеток примем равным пяти. Результаты расчета:

Таблица 2.14 - Местные сопротивления в ТВСМ

$\zeta_{вх}$	$\zeta_{вых}$	$\zeta_{н.р.}$	$\zeta_{в.р.}$	$\zeta_{др}$	ζ_d	$\Sigma \zeta_m$	$\Sigma \Delta p_m$, кПа
6	4	2	3	1,1	0	16,1	117,68

В итоге получаем, что потери давления в ТВС составляет 137,35 кПа. Примем КПД циркуляционного насоса равным 55%.

Затраты мощности на прокачку теплоносителя:

$$N_{\text{т.н.}} = \frac{G_v \Delta p}{\eta_{\text{н}}} = 398,2 \text{ кВт} \quad (2.8.3)$$

где G_v – объемный расход теплоносителя, $\eta_{\text{н}}$ – КПД циркуляционного насоса. Затраты мощности на прокачку теплоносителя малы и составляют приблизительно 1% от электрической мощности реактора ($N_{\text{э}} = 35 \text{ МВт}$).

Глава 3 Нейтронно-физический расчет

3.1 Формирование картограммы загрузки реактора.

Данные по конструкции ядерных реакторов и структуре активных зон судовых установок в доступной литературе предоставлены неполно, в связи с этим при проектировании морского транспортного реактора следует ориентироваться на теплофизические и нейтронно – физические параметры, а также конструктивные решения, принятые в уже существующих судовых ядерных установках и реакторах типа ВВЭР. Кроме того, в дальнейшем, выбранная компоновка активной зоны будет корректироваться рядом взаимоуточняющих нейтронно-физических и теплогидравлических расчетов.

Активная зона проектируемого реактора содержит:

- два типа ТВЭЛОВ разного обогащения: “легкие” ТВЭЛЫ и “тяжелые” ТВЭЛЫ;
- два типа СВП: меньшего и большего диаметра;
- кластеры, содержащие компенсирующие стержни (ПЭЛЫ);
- стержни аварийной защиты (АЗ).

Рассмотрим основные типы и состав ТВС активной зоны:

Таблица 3.1 – Типы и состав ТВС активной зоны реактора

Тип ТВС	Число ТВС	Число “легких” ТВЭЛОВ	Число “тяжелых” ТВЭЛОВ	Число СВП большего диаметра	Число СВП меньшего диаметра
ТВС центральной зоны	19	69	-	9	6
ТВС периферийной зоны	92	18	51	9	6

ТВС со стержнем АЗ	6	18	51	9	6
ТВС с пустым каналом	4	18	51	9	6

Конструкция всех типов ТВС практически одинакова и отличается лишь составом ТВЭлов и формой центрального вытеснителя.

Рассмотрим схемы всех ТВС активной зоны реактора:

1) ТВС периферийной зоны:

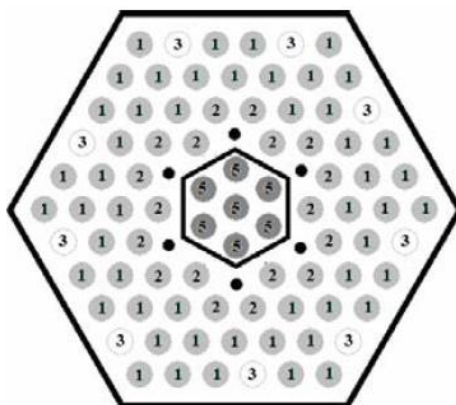


Рисунок 3.1 Схема ТВС периферийной зоны

2) ТВС центральной зоны:

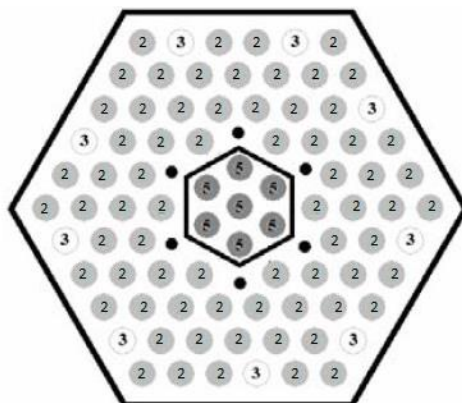


Рисунок 3.2 Схема ТВС центральной зоны

3) ТВС со стержнем АЗ:

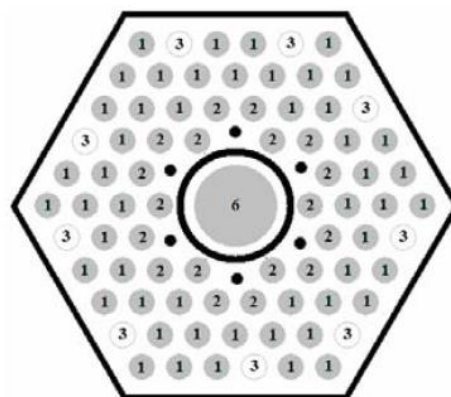


Рисунок 3.3 Схема ТВС со стержнем АЗ

4) ТВС с пустым каналом:

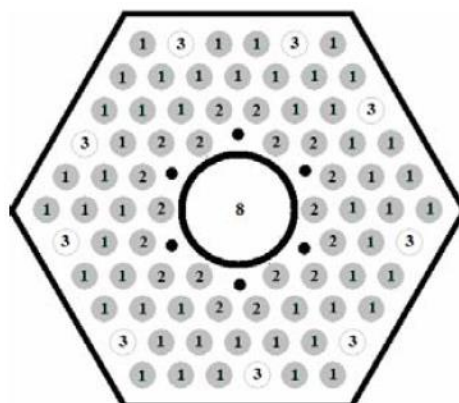


Рисунок 3.4 Схема ТВС с пустым каналом

На всех схемах приняты следующие обозначения:

1 – тяжелые ТВЭЛы; 2 – легкие ТВЭЛы; 3 – СВП большего диаметра; • - СВП меньшего диаметра; 5 – ПЭЛы; 6 – стержень АЗ; 8 – пустой канал.

Основные параметры ТВС указаны в тепловом расчете.

Решетка ТВЭЛов и СВП заполнена теплоносителем. В центральной и периферийных ТВС пространство также заполнено теплоносителем и предназначено для размещения компенсирующих ПЭЛов. Вытеснитель в ТВС со стержнем АЗ и пустым каналом имеет форму толстостенной гильзы и

заполнен воздухом для предотвращения гидравлического сопротивления в аварийной ситуации.

ТВС периферийной зоны содержат ТВЭЛы всех типов обогащения и составляют основную массу ТВС активной зоны ЯЭУ. В случае отсутствия ПЭЛов, в вытеснителе остается теплоноситель, хорошо замедляющий нейтроны, что способствует образованию всплеска энерговыделения в ТВЭлах, окружающий вытеснитель. Для компенсации всплеска и выравнивания энерговыделения ТВС вокруг чехла размещаются стержни СВП меньшего диаметра, а также внешнее кольцо стержней СВП большего диаметра.

ТВС центральной зоны содержат только “легкие” ТВЭЛы.

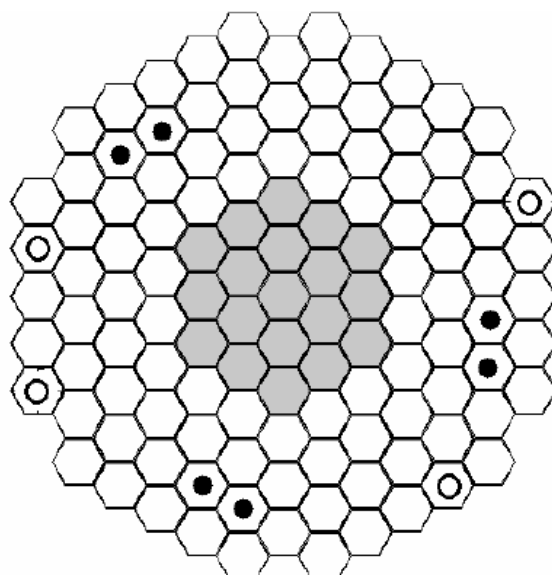
ТВС со стержнями АЗ расположены парами в разных частях активной зоны. В случае аварийной ситуации, все 6 стержней аварийной защиты сбрасываются, в результате чего цепная реакция деления должна быть прекращена. Для оперативности сброса стержней АЗ, вытеснитель ТВС со стержнем АЗ заполнен воздухом.

ТВС с пустым каналом располагаются вблизи отражателя активной зоны и предназначены для размещения пускового источника нейтронов, детекторов нейтронного поля и термопреобразователей.

Рассмотрим основные элементы ТВС и их составы. Данные, приведенные в таблице 3.2 в дальнейшем будут использованы для расчета и формирования библиотеки макроскопических констант, необходимых для дальнейшего нейтронно – физического расчета.

Таблица 3.2 – Элементы ТВС активной зоны реактора

Элемент ТВС	Материал, его состав и плотность (г/см^3)	Химические элементы, основные изотопы
Сердечник “тяжелого” ТВЭЛА, PuO_2 30%	МОКС-топливо ($\text{UO}_2 + \text{PuO}_2$), $\gamma_{\text{UO}_2} = 11$, $^{239}\text{Pu} - 52\%$, $^{240}\text{Pu} - 24\%$, $^{241}\text{Pu} - 15\%$	^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Pu , ^{238}U , ^{16}O
Сердечник “тяжелого” ТВЭЛА, PuO_2 28%		
Сердечник СВП меньшего диаметра	Gd_2O_3 , $\gamma = 7,6$, естественный состав	^{155}Gd , ^{157}Gd , ^{16}O
Сердечник СВП большого диаметра		
Сердечник ПЭЛа	B_4C , $\gamma = 2,5$, $^{10}\text{B} - 70\%$	^{10}B , ^{12}C
Сердечник стержня АЗ	B_4C , $\gamma = 2,5$, $^{10}\text{B} - 90\%$	
Теплоноситель	H_2O , $\gamma = 0,7$	^1H , ^{16}O
Пустой канал	Воздух, $75\% \text{N}_2 + 25\% \text{O}_2$, $\gamma = 1,45$	^{17}N , ^{16}O
Чехол ТВС	Сплав Э-110 ($\text{Zr} + 1\% \text{Nb}$), $\gamma = 6,5$	Zr , Nb
Конструкционный материал		
Чехол вытеснителя для ПЭЛов		
Оболочка СВП		
Гильза для стержня АЗ		
Оболочка ТВЭЛА		
Оболочка ПЭЛа	Сплав 42ХНМ ($42\% \text{Cr} + 56\% \text{Ni}$)	Cr , Ni







 - ТВС центральной зоны;
  - ТВС периферийной зоны;
  – ТВС со стержнем АЗ;
  – ТВС с пустыми каналами.

Рисунок 3.5 Схема активной зоны реактора

3.2 Подготовка макроскопических констант.

Для дальнейшего нейтронно-физического расчета, необходимо найти двухгрупповые макроскопические параметры для каждого типа ТВС. Более того, для ТВС центральной и периферийной зон необходимо знать макроскопические параметры в двух случаях: в случае погруженных ПЭЛов и в случае выведенных ПЭЛов из активной зоны реактора, аналогично для ТВС со стержнем АЗ: в случае сброшенного стержня аварийной защиты и в случае, когда стержень аварийной защиты выведен из реактора.

Расчет всех необходимых макроконстант выполним при помощи программы GETERA. В программе задается модель полячейки, параметрами которой являются:

- концентрация нуклидов в каждой отдельной зоне;
- кратность ячеек;
- матрица перетечек нейтронов между ячейками;
- температуры зон ячеек.

Концентрации нуклидов рассчитаем по формуле:

$$\rho_i = \varepsilon_i N_A \frac{\gamma_i}{M_r^i} \quad (3.2.1)$$

где ε_i – массовая доля; γ_i – плотность вещества; M_r^i – молярная масса вещества.

Приведем таблицу концентраций основных веществ активной зоны, на основе которой можно рассчитать концентрации отдельных нуклидов:

Таблица 3.3 – Свойства веществ, содержащихся в активной зоне

Вещество	$M_r \left(\frac{\text{г}}{\text{моль}} \right), \gamma \left(\frac{\text{г}}{\text{см}^3} \right)$	$\rho_i \left(\frac{1}{\text{см}^3} \right)$
Диоксид урана UO_2	$M_r = 270, \gamma = 11$	0,0220
Оксид гадолиния Gd_2O_3	$M_r = 362, \gamma = 7,6$	0,0126
Карбид бора B_4C	$M_r = 362, \gamma = 2.5$	0,0288
Вода H_2O	$M_r = 18, \gamma = 0.7$	0,0233
Кислород O_2	$M_r = 16, \gamma = 1,2,$ $\varepsilon = 25\%$	0,0045
Азот N_2	$M_r = 14, \gamma = 1,25,$ $\varepsilon = 75\%$	0,0144
Цирконий Zr	$M_r = 91, \gamma = 6,5$	0,0429
Никель Ni	$M_r = 58, \gamma = 8,9,$ $\varepsilon = 56\%$	0,0520
Хром Cr	$M_r = 52, \gamma = 7,19,$ $\varepsilon = 42\%$	0,0350

В программе GETERA задается 6 типов ячеек:

- “тяжелый” ТВЭЛ;

- “легкий” ТВЭЛ;
- СВП большего диаметра;
- СВП меньшего диаметра;
- ПЭЛ;
- Конструкционный материал.

Матрица перетечек нейтронов между ячейками определяется следующим образом: рассчитывается вероятность перехода нейтрона из ячейки i в ячейку j как отношение площади, смежной между обоими типами ячеек поверхности S_{ij} к площади поверхности S_i ячейки типа i .

$$P_{ij} = \frac{S_{ij}}{S_i} \quad (3.2.2)$$

Результаты расчета матриц перетечек для различных ТВС приведены в таблицах 3.4 и 3.5.

Таблица 3.4 - Матрица перетечек для центральной и периферийной ТВС

Тип ячейки	P_{ij}					
	“Тяжелый” ТВЭЛ	“Легкий” ТВЭЛ	СВП большого диаметра	СВП меньшего диаметра	ПЭЛ	КМ
“Тяжелый” ТВЭЛ	0,5882	0,1372	0,1176	0,0000	0,0000	0,1586
“Легкий” ТВЭЛ	0,3888	0,3333	0,0000	0,2222	0,0555	0,0000
СВП большого диаметра	0,6666	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,3333

СВП меньшего диаметра	0,0000	0,6666	0,0000	0,0000	0,3333	0,0000
ПЭЛ	0,0000	0,1428	0,0000	0,2857	0,5714	0,0000
КМ	0,2222	0,0000	0,0833	0,0000	0,0000	0,6944

Таблица 3.5 - Матрица перетечек для ТВС со стержнем АЗ и ТВС с пустым каналом

Тип ячейки	P_{ij}					
	“Тяжелый” ТВЭЛ	“Легкий” ТВЭЛ	СВП большого диаметра	СВП меньшего диаметра	ПЭЛ	КМ
“Тяжелый” ТВЭЛ	0,5882	0,1372	0,1176	0,0000	0,0000	0,1586
“Легкий” ТВЭЛ	0,3888	0,3333	0,0000	0,2222	0,0555	0,0000
СВП большого диаметра	0,6666	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,3333
СВП меньшего диаметра	0,0000	0,6666	0,0000	0,0000	0,3333	0,0000
ПЭЛ	0,0000	0,5000	0,0000	0,5000	0,0000	0,0000
КМ	0,2222	0,0000	0,0833	0,0000	0,0000	0,6944

Температуры зон ячеек возьмем из теплогидравлического расчета.

На основе вышепредставленных данных были рассчитаны макроскопические параметры для всех типов ТВС, необходимые для дальнейшего стационарного и динамического расчета. Были получены:

- коэффициенты диффузии D ;
- сечения поглощения Σ_a ;
- сечения деления Σ_f ;
- матрицы межгруппового перевода $\Sigma_{i \rightarrow j}$;
- сечения генерации нейтронов $\nu_f \Sigma_f$.

3.3 Стационарный расчет реактора в начале компании.

Стационарный расчет реактора в начале компании проведем при помощи программы SKETCH для нейтронно-физического расчета активной зоны реактора.

На начальном этапе расчета необходимо задать входные данные, необходимые для расчета:

- картограмму загрузки реактора;
- тепловую мощность реактора;
- разбиение активной зоны по высоте на слои;
- макроскопические параметры всех типов ТВС.

Картограмма загрузки активной зоны реактора составляется на основе рисунка 3.4.

Тепловую мощность реактора возьмем из теплогидравлического расчета и примем $Q_p = 132.8$ МВт. Высоту активной зоны разобьем на слои по 0.13 м. Макроскопические параметры всех типов ТВС были получены в пункте 3.2 данной главы.

```

      5 5 5 5 5 5 5 5 5
    5 5 5 5 5 5 5 5 5
  5 5 5 2 2 2 2 2 5 5
5 5 2 2 2 2 2 2 2 4 5 5
  5 5 2 2 2 2 2 2 2 2 5 5
5 5 2 2 2 2 2 2 2 2 2 5 5
  5 5 2 3 2 2 1 1 1 2 2 3 2 5 5
5 5 2 3 2 2 1 1 1 1 2 2 3 2 5 5
5 5 5 2 2 2 1 1 1 1 1 2 2 2 5 5 5
  5 5 2 2 2 2 1 1 1 1 2 2 2 2 5 5
    5 5 4 2 2 2 1 1 1 2 2 2 4 5 5
      5 5 2 2 2 2 2 2 2 2 2 5 5
        5 5 2 2 2 2 2 2 2 2 5 5
          5 5 4 2 2 2 3 3 2 2 5 5
            5 5 5 2 2 2 2 2 5 5 5
              5 5 5 5 5 5 5 5 5
                5 5 5 5 5 5 5 5

```

Рисунок 3.6 – Картограмма загрузки реактора для программы SKETCH: 1 – ТВС центральной зоны; 2 – ТВС периферийной зоны; 3 – ТВС со стержнем АЗ; 4 – ТВС с пустым каналом; 5 – отражатель

Для начала необходимо провести расчет условно – критической задачи для определения критической загрузки. Для этого будем погружать поглощающие стержни на различную глубину и следить за изменением эффективного коэффициента размножения $k_{эф}$. Предполагаем вначале, что глубина погружения всех стержней одинакова. Результаты представлены на рисунке 3.7.

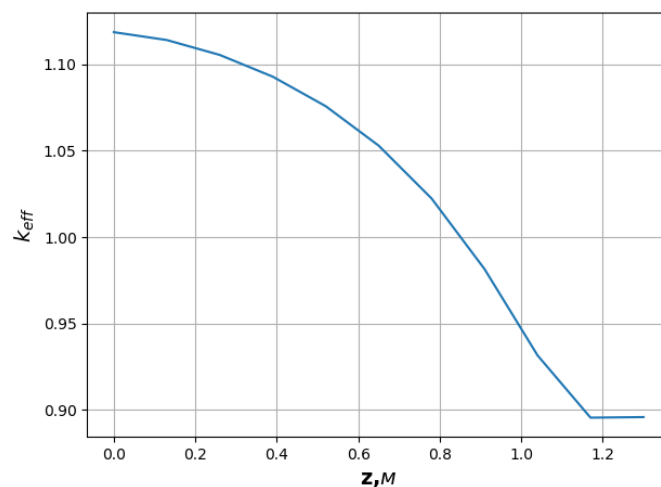


Рисунок 3.7 График зависимости $k_{эф}$ от глубины погружения поглощающих стержней

Из расчета следует, что глубина поглощающих стержней, при которой реактор становится критичным, равна 0.85 м.

Определим эффективность системы аварийной защиты. Для этого приведем реактор в критическое состояние и опустим стержни аварийной защиты. Результаты расчетов приведены в таблице 3.6.

Таблица 3.6 - Воздействие органов аварийной защиты на реактивность

Количество групп АЗ	$k_{эф}$	$\Delta\rho$
Одна группа стержней	0,006053	0,003947
Две группы стержней	0,991576	0,008424
Три группы стержней	0,986962	0,013038

Программа SKETCH позволяет получить данные о энерговыделении в активной зоне, коэффициенты k_r, k_z, k_v . На рисунке 3.8 представлено распределение плотности теплового потока на поверхности центрального максимально нагруженного ТВЭЛ по высоте ТВСМ.

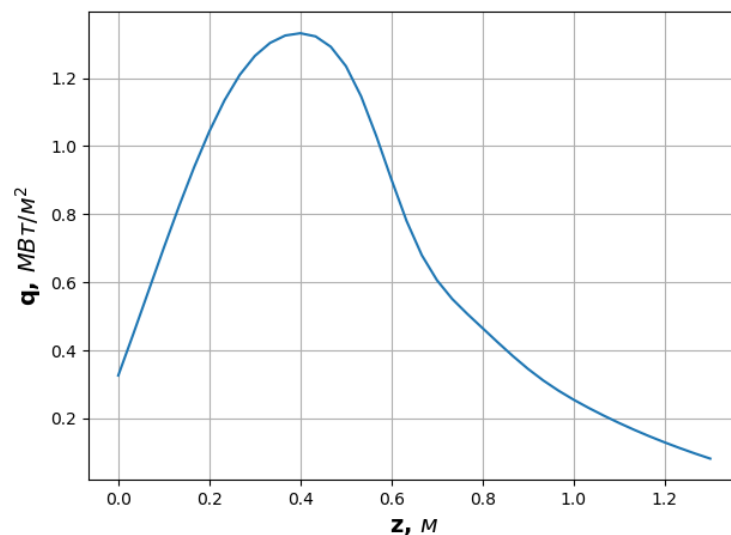


Рисунок 3.8 Распределение плотности теплового потока на поверхности максимально нагруженного ТВЭЛ по высоте ТВСМ

Таблица 3.7 – Параметры поля энерговыделения активной зоны

Параметр	Значение
Коэффициент неравномерности тепловыделения по радиусу k_r	1,164
Коэффициент неравномерности тепловыделения по высоте k_z	2,043
Коэффициент неравномерности тепловыделения по объему k_v	2,378

Найденное поле энерговыделения имеет коэффициент неравномерности по объему $k_v = 2,378$, что превышает значение, полученное в теплогидравлическом расчете ($k_v = 1,93$). Попробуем выровнять поле энерговыделения за счет поиска более оптимального размещения поглощающих стержней.

Схема активной зоны реактора состоит из двух основных групп: периферийной и центральной. Для выравнивания поля энерговыделения поднимем поглощающие стержни периферийной зоны на 1 слой вверх (0.13 м). Решая условно – критическую задачу, получаем, что реактор достигает критического состояния при полностью погруженных центральных поглощающих стержнях (рисунок 3.9).

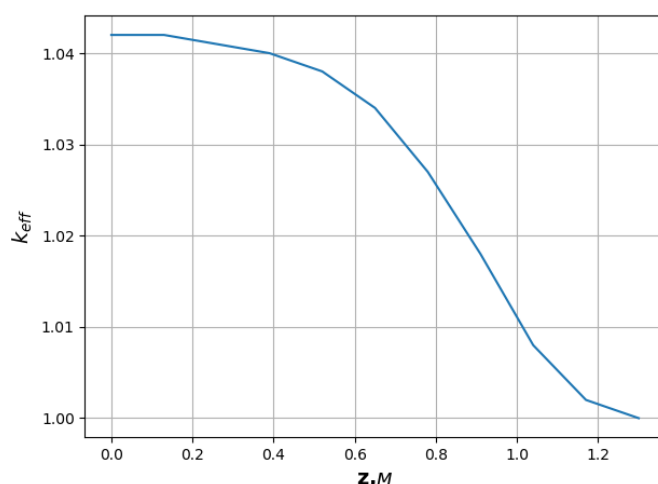


Рисунок 3.9 График зависимости $k_{эф}$ от глубины погружения поглощающих стержней центральной зоны

Аналогично, найдем распределение плотности теплового потока и параметры поля энергосвечения активной зоны:

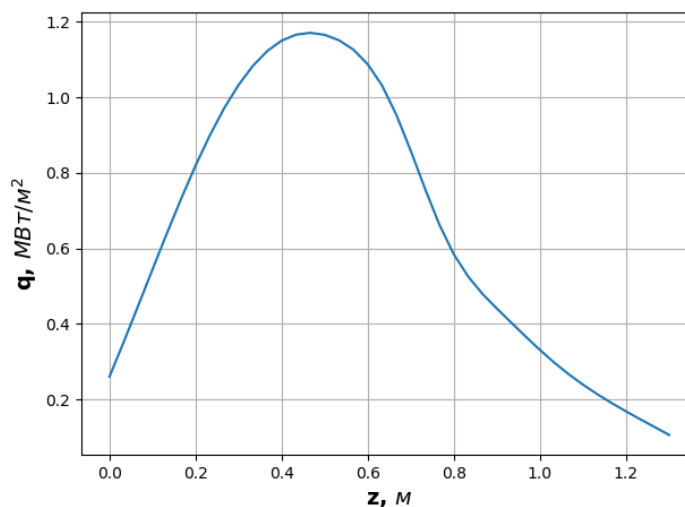


Рисунок 3.10 Распределение плотности теплового потока на поверхности максимально нагруженного ТВЭЛ по высоте ТВСМ

Таблица 3.8 – Параметры поля энергосвечения активной зоны

Параметр	Значение
Коэффициент неравномерности тепловыделения по радиусу k_r	1,122
Коэффициент неравномерности тепловыделения по высоте k_z	1,770
Коэффициент неравномерности тепловыделения по объему k_v	1,985

В результате можно заметить, что поле энергосвечения получило более выровненную форму, чем в первоначальном варианте, а коэффициент неравномерности по объему приблизился к значению, полученному в теплогидравлическом расчете. Благодаря этому, была снижена нагрузка на максимально нагруженный ТВЭЛ.

3.4 Уточнение теплогидравлического расчета.

На основе данных, полученных в пункте 4.3, проведем уточнение теплогидравлического расчета. Для этого, рассмотрим тепловыделяющую

сборку с максимальным энерговыделением (ТВСМ) и построим температурные зависимости по высоте ТВСМ.

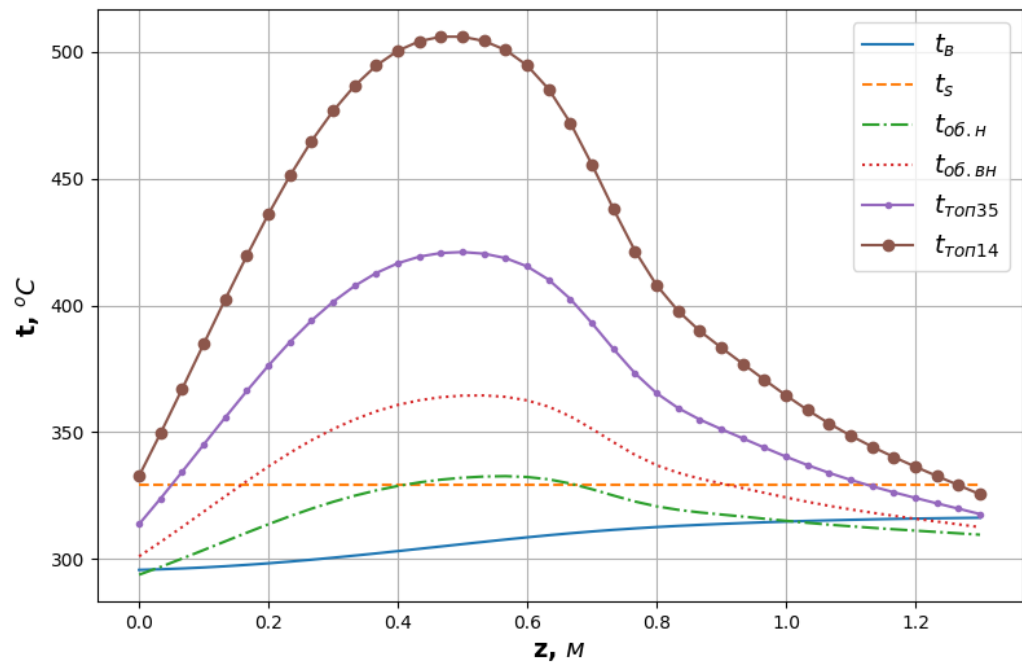


Рисунок 3.11 Распределения температур ТВСМ

Из рисунка 3.11 видно, что максимальная температура топлива при $t_{\text{топ35}}^{\text{max}} = 431^\circ\text{C}$ значительно ниже проектного предела (600°C), более того, даже при уменьшении коэффициента теплопроводности топлива при высокой глубине выгорания максимальная температура составляет $t_{\text{топ14}}^{\text{max}} = 515^\circ\text{C}$, что удовлетворяет проектному пределу. Температура воды не превышает температуру насыщения при давлении $p = 12,7$ Мпа. Температура внешней оболочки твэла превышает температуру насыщения воды на значительном участке, однако, как показывает расчет, недогрев потока воды до температуры насыщения на данном участке достаточно велик, следовательно, поверхностное кипение здесь маловероятно. Кроме того, температура внешней оболочки твэла $t_{\text{об.н}}^{\text{max}} = 332.6^\circ\text{C}$, что меньше проектного предела 334°C . Из вышесказанного можно сделать вывод о том, что полученная конфигурация активной зоны удовлетворяет теплогидравлическим требованиям.

3.5 Оценка компании реактора при однократной загрузке топлива.

Проведем оценку компании реактора, а также выгорания топлива при однократной загрузке реактора. Основным критерием определения длительности компании является выход реактора в критическое состояние. Следовательно, для оценки компании реактора и потенциала топлива необходимо построить графики зависимости $k_{эф}(t)$ и $PT(t)$.

Для предварительной оценки компании реактора временно перейдем от рассмотрения пространственного распределения выгорания топлива в активной зоне к рассмотрению отдельной ТВС. В рассматриваемом проекте присутствуют 2 типа ТВС – центральные и периферийные, отличающиеся типами твэлов. Так как обогащение двух различных типов твэлов отличается на 2%, что не дает заметных отличий в выгорании, произведем расчет для одного типа ТВС (центрального).

Воспользуемся средствами программы GETERA. На каждом шаге выгорания (шаг примем равным 50 суток) будем вычислять значение $k_{эф}$. Так как программа GETERA позволяет получить только значение k_{∞} , необходимо умножать его на вероятность утечки нейтрона из реактора, полученную следующим образом:

$$P = \frac{k_{эф}(0)}{k_{\infty}(0)} \quad (3.2.2)$$

где значение $k_{эф}(0)$ было получено с помощью программы SKETCH. Для упрощения расчетов считаем, что P не зависит от выгорания топлива. Полученные зависимости представлены на рисунках 3.12 и 3.13.

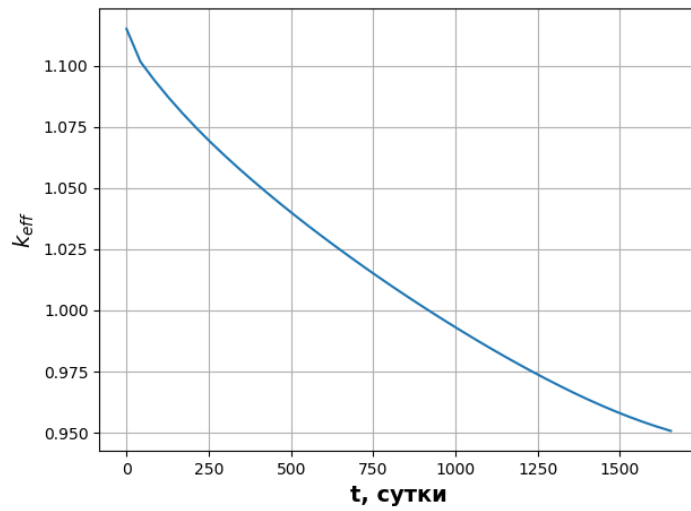


Рисунок 3.12 График зависимости эффективного коэффициента размножения нейтронов от времени

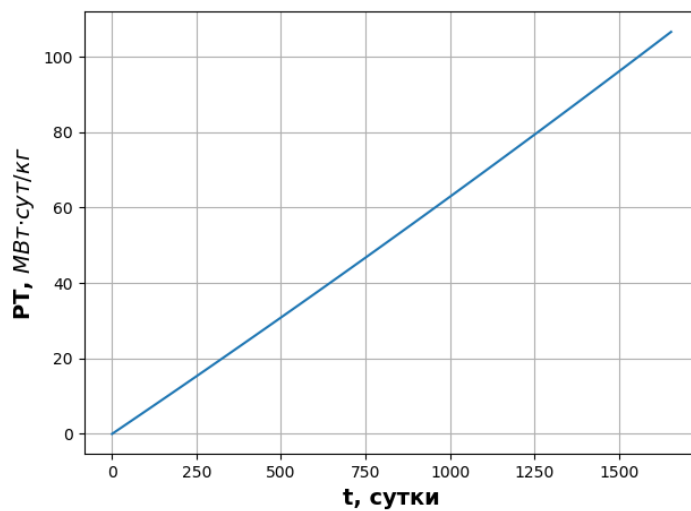


Рисунок 3.13 График зависимости выгорания топлива от времени

Из графиков видно, что реактор станет критичным в момент $t = 920$ суток, что составляет приблизительно 2,5 года, а среднее выгорания топлива в конце кампании реактора составляет $57 \frac{\text{МВт} \cdot \text{сут}}{\text{кг}}$. Кампания активной зоны по проекту составляет 2,5 – 3 года, что соответствует полученным результатам.