

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 курсовому проекту на тему:**

**«Инженерные расчеты и проектирование реактора
ВВЭР-1000»**

Студент:	Панин М.Д.	_____
Руководитель:	Маслов Ю.А.	_____
Руководитель со стороны 5 кафедры:	Волков Ю.Н.	_____

Москва
2022

Содержание

1. Описание конструкции реактора	3
2. Теплофизический расчет	4
2.1. Постановка задачи	4
2.2. Исходные данные для проведения расчетов	5
2.3. Выбор турбины	6
2.4. Расчет КПД термодинамического цикла	8
2.5. Расчет изменения теплового потока в наиболее нагруженном канале	10
2.6. Расчет распределения температуры теплоносителя по высоте . .	10
2.7. Расчет распределения температуры внешней стенки оболочки по высоте	11
2.8. Расчет температуры топлива	15
2.9. Определение перепадов давления и необходимой мощности насосов на прокачку	16
2.10. Выводы из теплофизического расчета	18
3. Нейтронно-физический расчет	19
3.1. Постановка задачи	19
3.2. Описание инструмента ячеечного расчета	19
3.3. Модель ячейки	19
3.4. Расчет ячеек без выгорания	20
3.5. Расчет полиячеек без выгорания	21
3.6. Расчет длительности цикла и выгорания при частичных перегрузках	21

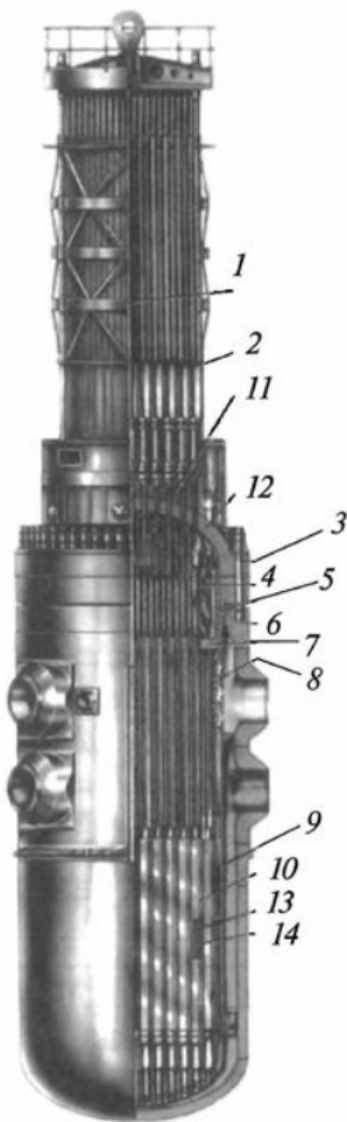
1. Описание конструкции реактора

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 1.1.

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.

Реактор имеет двухконтурную систему. Энергия, выделяющаяся в результате цепной 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 внутрикорпусной шахтой, 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.



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 1.1. Общий вид реактора ВВЭР-1000 в сборе

2. Теплофизический расчет

2.1. Постановка задачи

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

1. Выбор турбины и разработка принципиальной теплосиловой схемы установки;
2. Расчет КПД проектируемой установки;

3. Расчет 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
Толщина чехла ТВС $\delta_{\text{чехла}}$, мм	1.5
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 $\delta_{\text{Г}}$, 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](#)

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

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

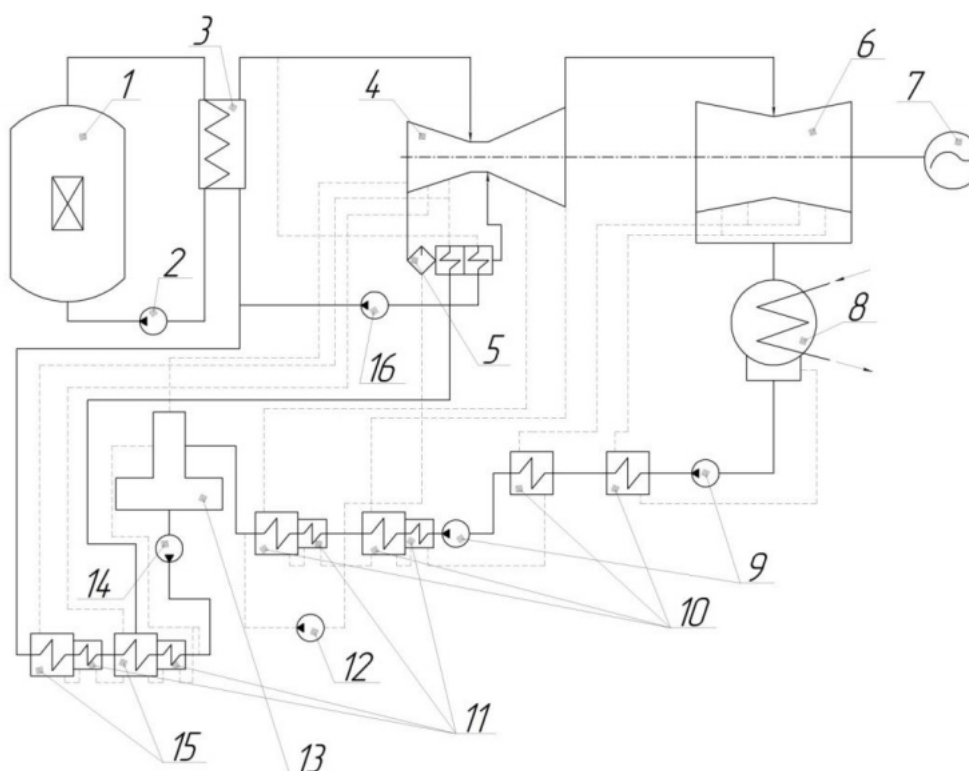


Рисунок 2.1. Тепловая схема АЭС: 1 – ядерный реактор, 2 – главный циркуляционный насос, 3 – парогенератор, 4 – цилиндр высокого давления, 5 – сепаратор-пароперегреватель, 6 – цилиндры низкого давления, 7 – генератор, 8 – конденсатор, 9 – конденсационный электронасос, 10 – подогреватель низкого давления, 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

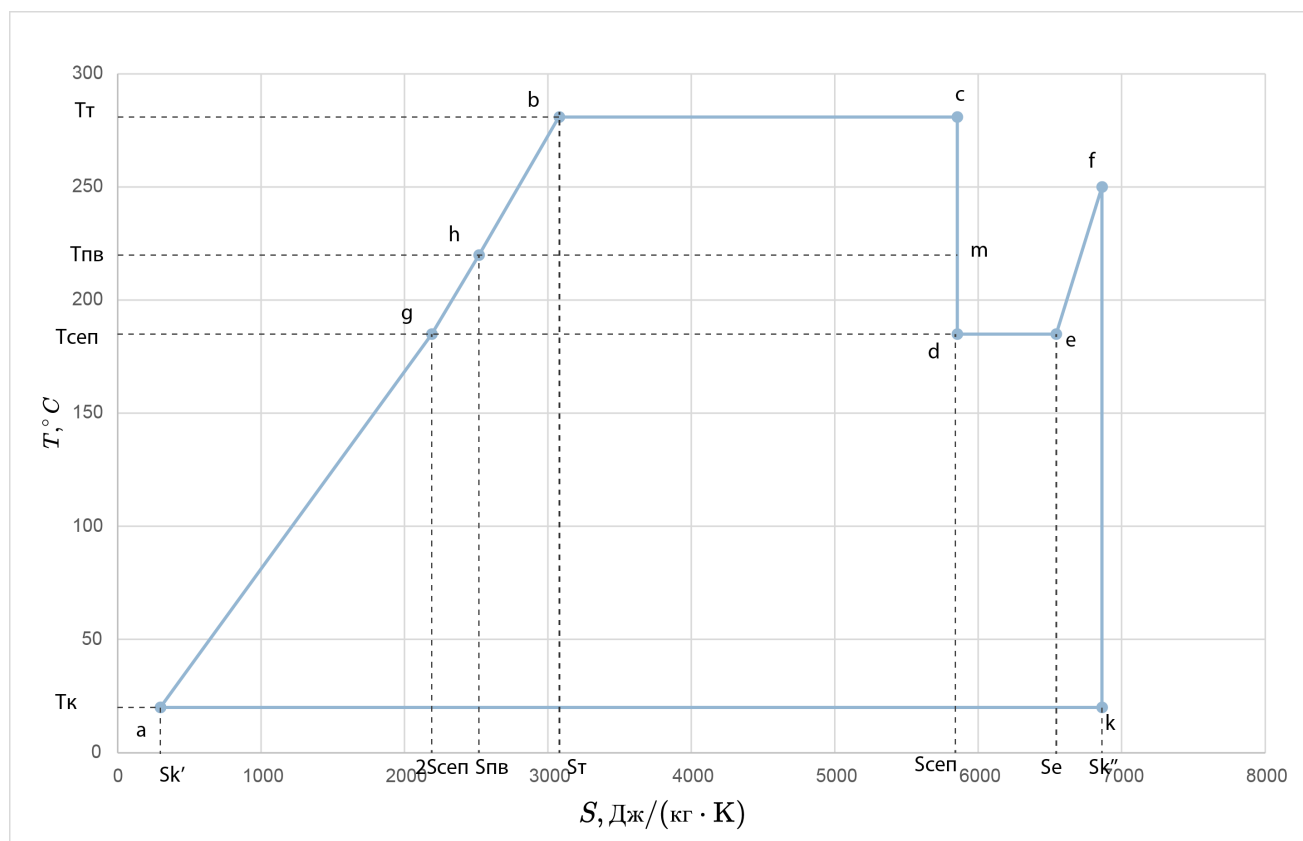


Рисунок 2.2. TS диаграмма турбинного цикла в реакторе ВВЭР-1000 : hbc — нагрев и испарение в парогенераторе; cd — расширение пара в ЦВД; de — пар отделяется от конденсата в сепараторе; ef — пар поступает в промежуточный пароперегреватель; fk — расширение пара в ЦНД; ka — конденсация в конденсаторе; ag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

Таблица 2.3: Значения параметров TS-диаграммы

Точка	P, МПа	T, °C	S, Дж/(кг · К)	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:

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

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

$$\eta_{t0} = 3.854 \cdot 10^{-01}$$

Термический КПД с идеальной регенерацией:

$$\eta_{t\infty} = 1 - \frac{T_k \cdot (s_f - s_g) (s_c - s_h)}{(h_c - h_h) \cdot (s_e - s_g) + (h_f - h_e) \cdot (s_c - s_h)}$$

$$\eta_{t\infty} = 1 - \frac{3.017 \cdot 10^2 \cdot (6.936 \cdot 10^3 - 2.130 \cdot 10^3) (5.898 \cdot 10^3 - 2.516 \cdot 10^3)}{(2.786 \cdot 10^6) - 9.429 \cdot 10^5 \cdot (6.592 \cdot 10^3 - 2.130 \cdot 10^3) + (2.944 \cdot 10^6 - 2.776 \cdot 10^6) \cdot (5.898 \cdot 10^3 - 2.516 \cdot 10^3)}$$

$$\eta_{t\infty} = 4.420 \cdot 10^{-01}$$

Термический КПД с $n = 7$ регенеративными отборами:

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

Учитываем: $\eta^{\text{BH}} = 0.85$ — 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:

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

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

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

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 $h_{\text{эф}} = 3.715$ м. максимальная величина теплового потока на один ТВЭЛ:

$$q_{\text{max}} = \frac{Q_{\text{теп}} K_r K_z}{N_{\text{ТВС}} N_{\text{ТВЭЛ}} H_{\text{аз}}} = \frac{2.904 \cdot 10^9 \cdot 1.25 \cdot 1.5}{163 \cdot 317 \cdot 3.5} = 3.010 \cdot 10^2 \frac{\text{Вт}}{\text{см}}$$

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:

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

Расход теплоносителя через реактор:

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

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:

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

Отсюда максимальная температура жидкости $T_{\text{ТН}}^{\text{max}} = 328.54 \text{ } ^\circ\text{C}$. График изменения температуры теплоносителя по высоте представлен на 2.3

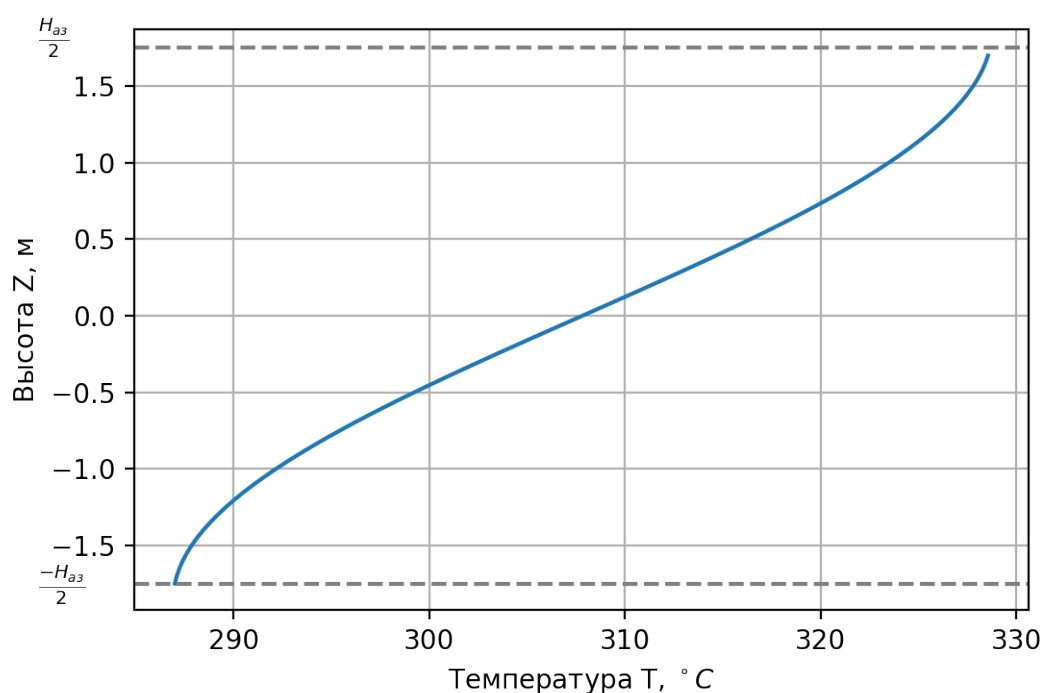


Рисунок 2.3. Изменение температуры теплоносителя по высоте

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

2.7. Расчет распределения температуры внешней стенки оболочки по высоте

Площадь проходного сечения:

$$S_{\text{прох}} = \sqrt{3}/2(a - 2 \cdot \delta_{\text{чехла}})^2 - N_{\text{ТВЭЛ}} \frac{\pi d_{\text{ТВ}}^2}{4} - N_{\text{н.к.}} \frac{\pi D_{\text{н.к.}}^2}{4} - \frac{D_{\text{ц.к.}}^2 \pi}{4}$$

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

$$S_{\text{прох}} = 2.402 \cdot 10^4 \text{мм}^2$$

Периметр:

$$\Pi = (2(a - 2\delta_{\text{чехла}})\sqrt{3}) - N_{\text{ТВЭЛ}} \pi d_{\text{ТВ}} + N_{\text{н.к}} \pi D_{\text{н.к}} + \pi D_{\text{ц.к}}$$

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

$$\Pi = 1.037 \cdot 10^4 \text{мм}$$

Гидравлический диаметр:

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

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):
Число Рейнолдса:

$$\text{Re} = \frac{G_{\text{реак}} \cdot d_{\Gamma}}{N_{\text{ТВС}} \cdot S_{\text{прох}} \cdot \mu} = 4.283 \cdot 10^5$$

Коэффициент гидравлического сопротивления:

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

Расчитываем число Нуссельта:

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

, 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:

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

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:

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

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:

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

Распределение температуры внешней стенки твэла по высоте реактора представлено на [2.4](#)

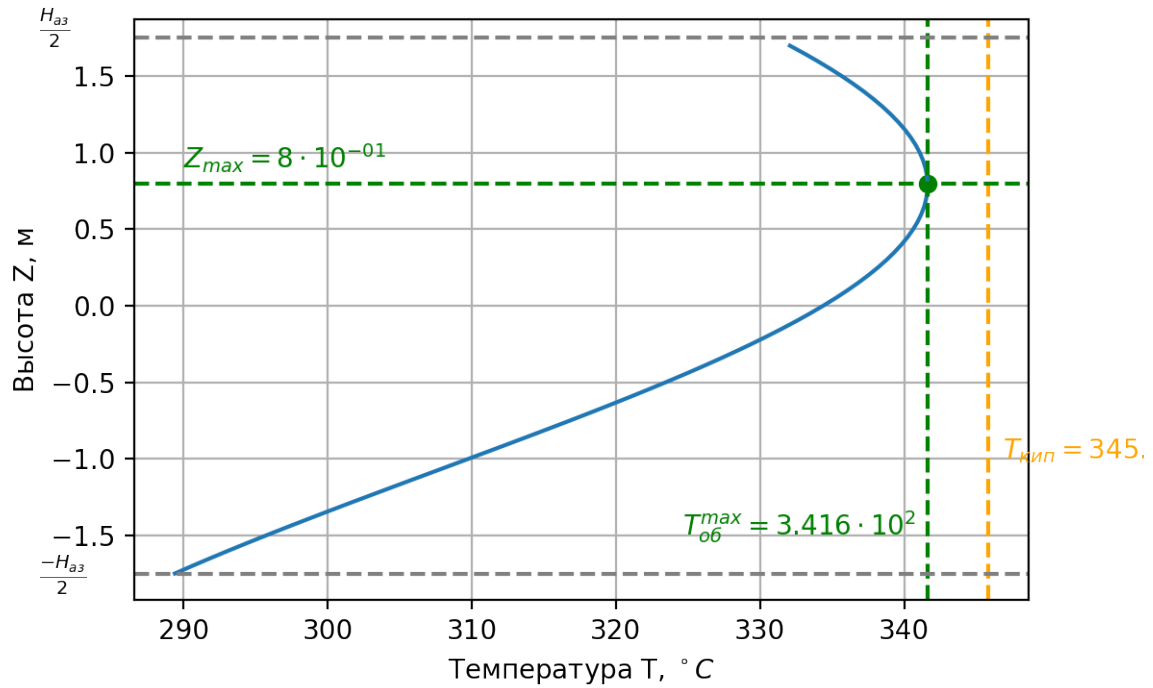


Рисунок 2.4. Изменение температуры стенки твэла по высоте

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

Общий график для распределений теплоносителя и оболочки представлены на 2.5

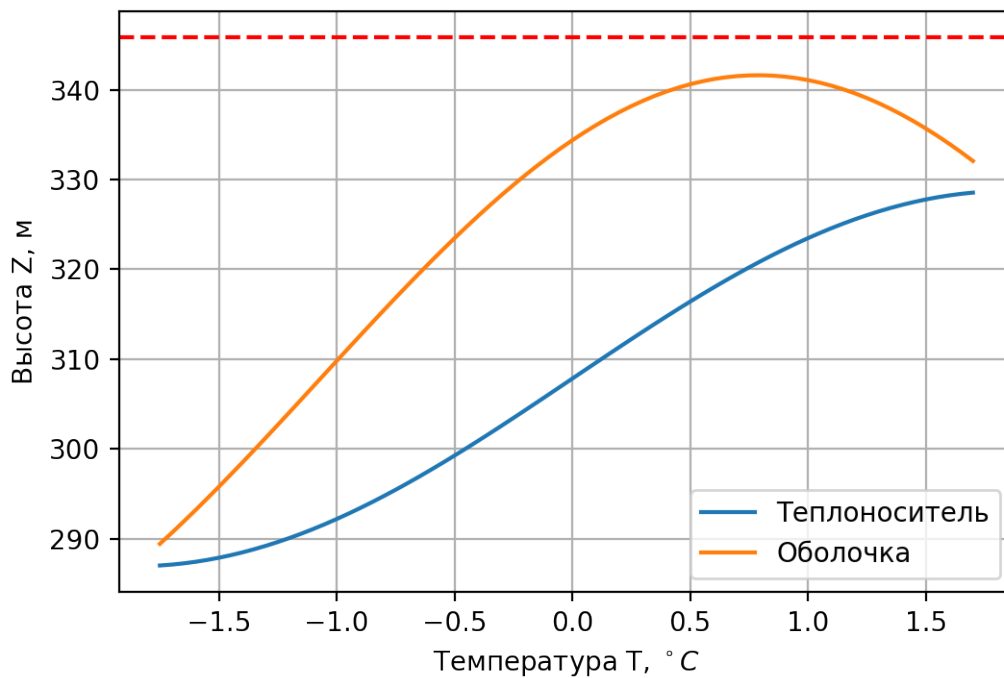


Рисунок 2.5. Изменение температуры стенки твэла и теплоносителя по высоте

2.8. Расчет температуры топлива

Произведём расчет термического сопротивления оболочки, газового зазора и топлива:

$$\begin{aligned}
 \sum R_i &= \frac{\ln \frac{d_{\text{ТВ}}}{d_{\text{ТВ}} - 2\delta}}{2\pi\lambda_{\text{об}}} + \frac{\ln \frac{d_{\text{ТВ}} - 2\delta}{d_{\text{ТОП}}}}{2\pi\lambda_{\text{г.з}}} + \frac{\frac{1}{2} - \frac{d_{\text{ОТВ}}^2}{d_{\text{ТОП}}^2 - d_{\text{ОТВ}}^2} \ln \frac{d_{\text{ТОП}}}{d_{\text{ОТВ}}}}{2\pi\lambda_{\text{ТОП}}} = \\
 &= \frac{\ln \frac{9.100 \cdot 10^{-03}}{9.100 \cdot 10^{-03} - 2 \cdot 6.500 \cdot 10^{-04}}}{2 \cdot \pi \cdot 2.010 \cdot 10^1} + \\
 &+ \frac{\ln \frac{9.100 \cdot 10^{-03} - 2 \cdot 6.500 \cdot 10^{-04}}{7.530 \cdot 10^{-03}}}{2\pi \cdot 3.500 \cdot 10^{-01}} + \\
 &+ \frac{0.5 - \frac{(1.300 \cdot 10^{-03})^2}{(7.530 \cdot 10^{-03})^2 - (1.300 \cdot 10^{-03})^2} \ln \frac{7.530 \cdot 10^{-03}}{1.300 \cdot 10^{-03}}}{2\pi \cdot 3.500} = \\
 &= 3.752 \cdot 10^{-02} \frac{\text{м} \cdot \text{К}}{\text{Вт}}
 \end{aligned}$$

где

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

Распределение температур в топливе по высоте активной зоны:

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

График изменения температуры топлива по высоте представлен на 2.6

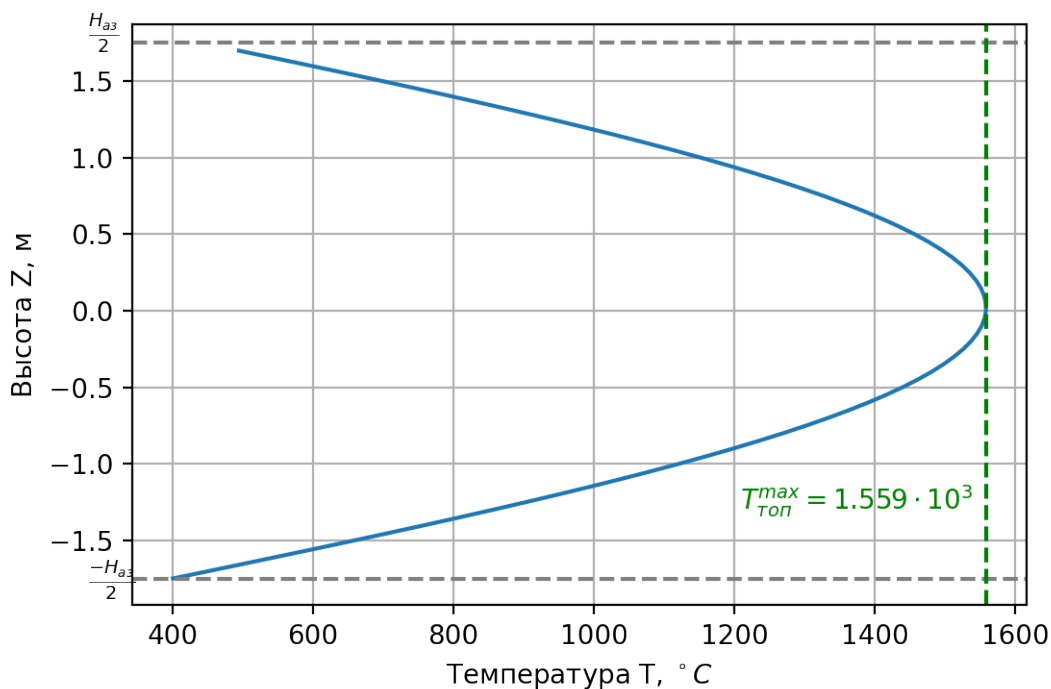


Рисунок 2.6. Изменение температуры топлива по высоте

Максимальная температура топлива $T_{\text{топ}} = 1559^{\circ}\text{C}$ при $Z_{\text{max}} = 0\text{м}$. 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, найде перепад давления в ТВС Гидравлическое сопротивление трения по формуле Дарси:

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

где

- w , средняя скорость теплоносителя:

$$w = \frac{G_{\text{реак}}}{\rho_{\text{ср}} \cdot S_{\text{прох}} \cdot N_{\text{ТВС}}} = \frac{1.579 \cdot 10^4}{7.165 \cdot 10^2 \cdot 2.402 \cdot 10^{-02} \cdot 1.630 \cdot 10^2} = 5.629 \text{ м/с}$$

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

Потеря напора на ускорение:

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

, где $\rho_{\text{вых}} = 680.8 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, $\rho_{\text{вх}} = 752.1 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

Нивелирный напор:

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

Местное сопротивление:

$$\Delta P_{\text{мест}} = \frac{\left(\frac{1.579 \cdot 10^4}{1.63 \cdot 2.402 \cdot 10^{-02}} \right)^2}{2} \cdot \left(\frac{2.6}{7.521 \cdot 10^2} + \frac{13 \cdot 0.45}{7.165 \cdot 10^2} + \frac{0.26}{6.808 \cdot 10^2} \right) = 9.761 \cdot 10^4 \text{ Па}$$

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 прохождении 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:

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

, 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 будут выполнены следующие задачи:

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

Расчет ячеек без выгорания

Построение модели поля ячеек и их расчет без выгорания

Расчет длительности цикла и выгорания при частичных перегрузках

2. Расчет энерговыделения и коэффициента неравномерности активной зоны в приближении гомогенизированных ячеек

3.2. Описание инструмента ячеечного расчета

Для расчета свойств ТВС использовались возможности программного комплекса GETERA-93.

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 ₂ O

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

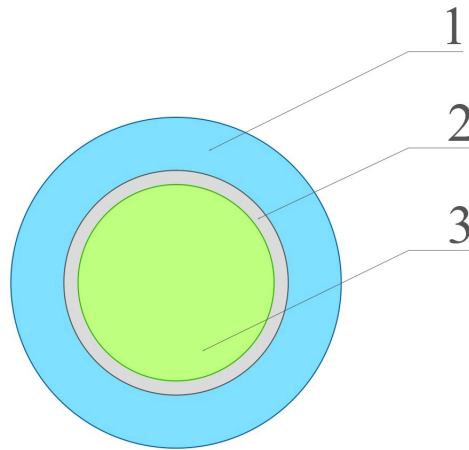


Рисунок 3.1. Геометрия элементарной топливной ячейки. 1 — замедлитель, 2 — оболочка, 3 — топливо

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. Результирующее 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 частичных 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 полиячейки дает аналогичный результат расчету элементарной ячейки без выгорания, из чего можно сделать вывод что модель полиячейки построена верно.

3.6. Расчет длительности цикла и выгорания при частичных перегрузках

Используя полиячеечную модель из предыдущего этапа воспроизведем трехцикловой 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: Концентрации элементов

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 (Pu39 + Pu41) в отработавшем топливе, кг/тонна топлива	14.87
Содержание делящегося изотопа (U235) в отработавшем топливе, кг/тонна топлива	11.4
Загрузка делящихся нуклидов, кг/тонна топлива	47