

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: Терновых М.Ю. \_\_\_\_\_

Рецензент \_\_\_\_\_

Зав. Кафедрой Харитонов В.С. \_\_\_\_\_

Москва  
2022

# Содержание

<b>1. Описание конструкции реактора</b>	<b>3</b>
<b>2. Теплофизический расчет</b>	<b>4</b>
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
<b>3. Нейтронно-физический расчет</b>	<b>19</b>
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

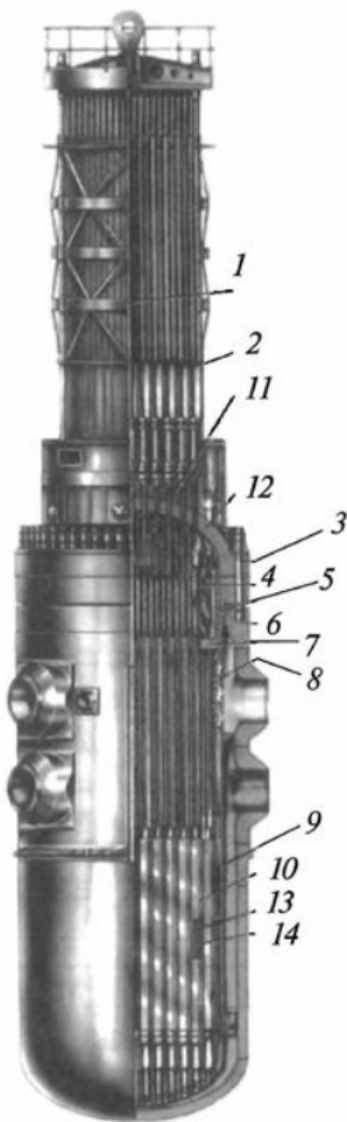
# 1. Описание конструкции реактора

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, $^\circ\text{C}$	280
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

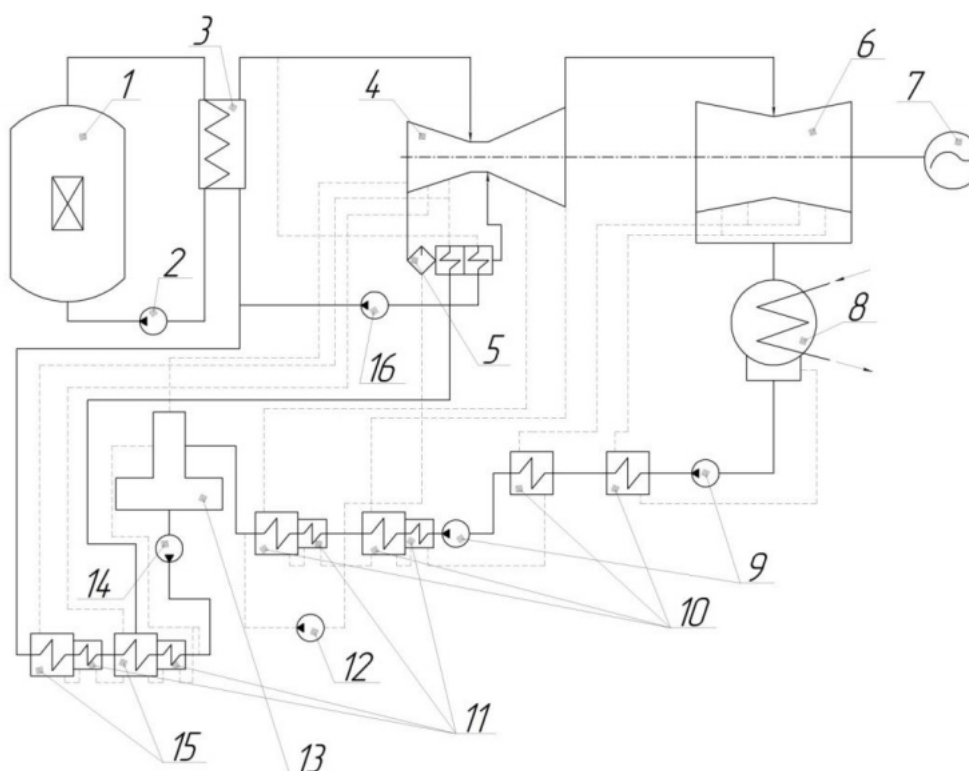


Рисунок 2.1. Тепловая схема АЭС: 1 – ядерный реактор, 2 – главный циркуляционный насос, 3 – парогенератор, 4 – цилиндр высокого давления, 5 – сепаратор-пароперегреватель, 6 – цилиндры низкого давления, 7 – генератор, 8 – конденсатор, 9 – конденсационный электронасос, 10 – подогреватель низкого давления,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

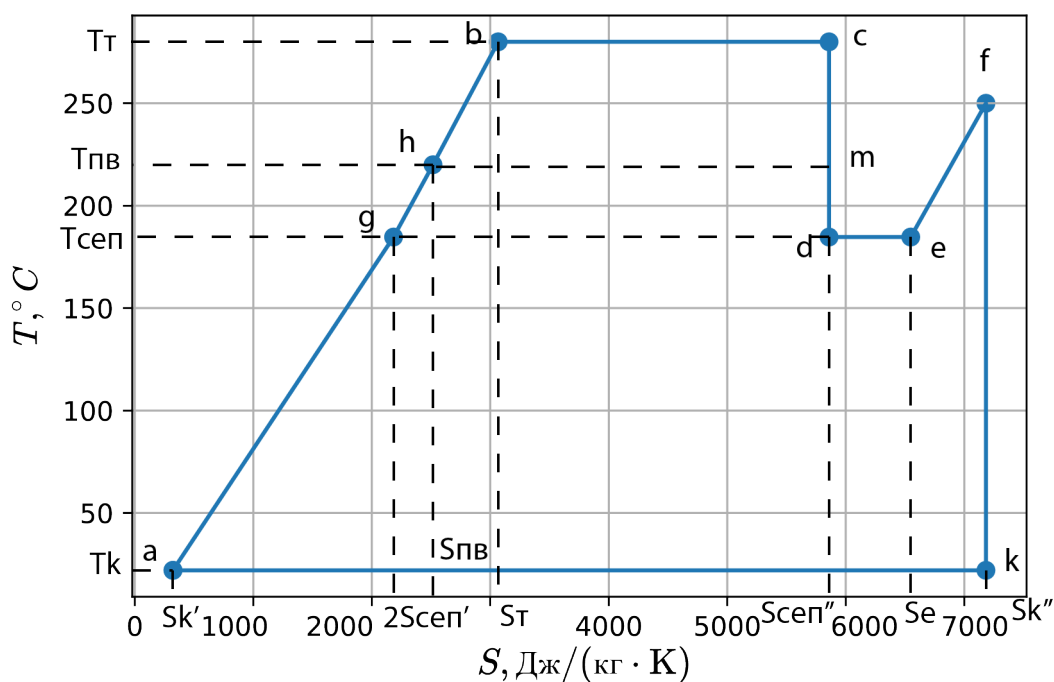


Рисунок 2.2. TS диаграмма турбинного цикла в реакторе ВВЭР-1000 : hbc — нагрев и испарение в парогенераторе; cd — расширение пара в ЦВД; de — пар отделяется от конденсата в сепараторе; ef — пар поступает в промежуточный пароперегреватель; fk — расширение пара в ЦНД; ka — конденсация в конденсаторе; ag — 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	7199.86	2943.61
k	0.004	30.5	7199.86	2178.6
k'	0.004	30.5	442.236	127.396
a	5.9	30.5	440.4	132.8
g	0.98	179.2	2130.2	758.9

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

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

$$\eta_{t0} = 1 - \frac{3.035 \cdot 10^2 \cdot (7.200 \cdot 10^3 - 4.404 \cdot 10^2) \cdot 8.445 \cdot 10^{-01}}{(2.786 \cdot 10^6 - 7.589 \cdot 10^5) + 8.445 \cdot 10^{-01} ((7.589 \cdot 10^5 - 1.328 \cdot 10^5) + (2.944 \cdot 10^6 - 2.776 \cdot 10^6))}$$

$$\eta_{t0} = 3.575 \cdot 10^{-01}$$

Термический КПД с идеальной регенерацией:

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

$$\eta_{t\infty} = 1 - \frac{3.035 \cdot 10^2 \cdot (7.200 \cdot 10^3 - 2.130 \cdot 10^3) (5.898 \cdot 10^3 - 2.516 \cdot 10^3)}{(2.786 \cdot 10^6) - 9.429 \cdot 10^5) \cdot (6.592 \cdot 10^3 - 2.130 \cdot 10^3) + (2.944 \cdot 10^6 - 2.776 \cdot 10^6) \cdot (5.898 \cdot 10^3 - 2.516 \cdot 10^3)}$$

$$\eta_{t\infty} = 4.078 \cdot 10^{-01}$$

Термический КПД с  $n = 7$  регенеративными отборами:

$$\eta_{tn} = \eta_{t0} + (\eta_{t\infty} - \eta_{t0}) \cdot \frac{n}{n+1} = 3.575 \cdot 10^{-01} + (4.078 \cdot 10^{-01} - 3.575 \cdot 10^{-01}) \cdot \frac{7}{8} = 4.015 \cdot 10^{-01}$$

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:

$$\eta_{\text{брутто}} = \eta^7 \cdot \eta^{\text{BH}} \cdot \eta_{\text{ос}} \cdot \eta_{\text{эг}} \cdot \eta_{\text{мех}} = 0.335 = 4.015 \cdot 10^{-01} \cdot 0.85 \cdot 0.98 \cdot 0.98 \cdot 0.97 = 3.179 \cdot 10^{-01}$$

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

$$Q_{\text{теп}} = \frac{Q_{\text{эл}}}{\eta_{\text{брутто}}} = \frac{1.000 \cdot 10^9}{3.179 \cdot 10^{-01}} = 3.146 \cdot 10^9 \text{ МВт}$$

## 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:

$$q_{\text{max}} = \frac{Q_{\text{теп}} K_r K_z}{N_{\text{ТВС}} N_{\text{ТВЭЛ}} H_{\text{аз}}} = \frac{3.146 \cdot 10^9 \cdot 1.25 \cdot 1.5}{163 \cdot 317 \cdot 3.5} = 3.261 \cdot 10^2 \frac{\text{Вт}}{\text{см}}$$

Зависимость величины теплового потока от высоты:

$$q(z) = q_{\text{max}} \cos\left(\frac{\pi \cdot z}{H_{\text{эф}}}\right) = 3.261 \cdot 10^2 \cos\left(\frac{\pi \cdot z}{3.715}\right) \left[\frac{\text{Вт}}{\text{см}}\right]$$

## 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:

$$G_{\text{ТВС}} = \frac{Q_{\text{теп}}}{(h_{\text{вых}} - h_{\text{вх}}) N_{\text{ТВС}}} = \frac{3.146 \cdot 10^9}{(1.452 \cdot 10^6 - 1.268 \cdot 10^6) \cdot 163} = 1.049 \cdot 10^2 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

Расход теплоносителя через реактор:

$$G_{\text{реак}} = \frac{Q_{\text{теп}}}{(h_{\text{вых}} - h_{\text{вх}})} = \frac{3.146 \cdot 10^9}{(1.452 \cdot 10^6 - 1.268 \cdot 10^6)} = 1.710 \cdot 10^4 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

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

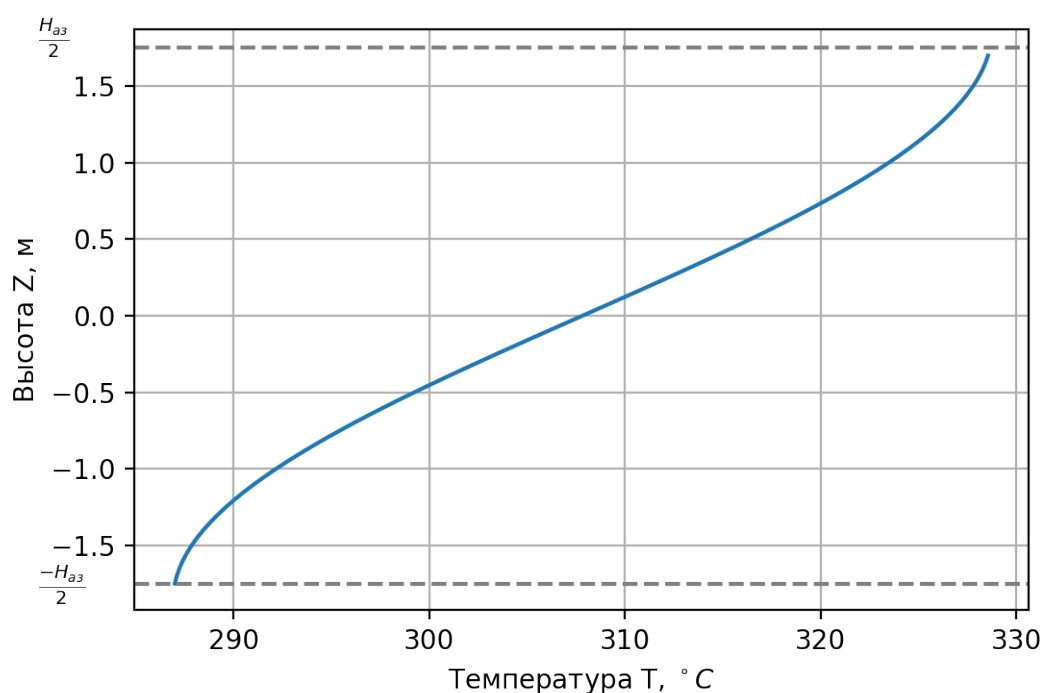


Рисунок 2.3. Изменение температуры теплоносителя по высоте

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 Рейнольдса:

$$\text{Re} = \frac{G_{\text{реак}} \cdot d_{\Gamma}}{N_{\text{ТВС}} \cdot S_{\text{прох}} \cdot \mu} = 4.640 \cdot 10^5$$

Коэффициент гидравлического сопротивления:

$$\xi = (1,82 \cdot \log(\text{Re}) - 1.64)^{-2} = 0.013$$

Расчитываем число Нуссельта:

$$\begin{aligned} \text{Nu} &= \frac{\frac{\xi}{8} \cdot \text{Re} \cdot \text{Pr}}{k + 12.7 \cdot \left(\text{Pr}^{\frac{2}{3}} - 1\right) \cdot \sqrt{\frac{\xi}{8}}} = \\ &= \frac{\frac{1.329 \cdot 10^{-02}}{8} \cdot 4.640 \cdot 10^5 \cdot 8.729 \cdot 10^{-01}}{1 + \frac{900}{4.640 \cdot 10^5} + 12.7 \cdot \left((8.729 \cdot 10^{-01})^{\frac{2}{3}} - 1\right) \cdot \sqrt{\frac{1.329 \cdot 10^{-02}}{8}}} = 7.033 \cdot 10^2 \end{aligned}$$

, где  $k = 1 + \frac{900}{Re}$

Коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha_1 = \frac{Nu \cdot \lambda}{d_r} = \frac{7.033 \cdot 10^2 \cdot 5.536 \cdot 10^{-01}}{9.263 \cdot 10^{-03}} = 4.203 \cdot 10^4 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

По формуле Диттуса-Болтера:

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} = 743.6$$

Коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha_2 = \frac{Nu \cdot \lambda}{d_r} = \frac{7.436 \cdot 10^2 \cdot 5.536 \cdot 10^{-01}}{9.263 \cdot 10^{-03}} = 4.444 \cdot 10^4 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

По формула М.А. Михеева:

$$Nu = 0.021 Re^{0.8} Pr^{0.43} = 676.2$$

Коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha_3 = \frac{Nu \cdot \lambda}{d_r} = \frac{6.762 \cdot 10^2 \cdot 5.536 \cdot 10^{-01}}{9.263 \cdot 10^{-03}} = 4.041 \cdot 10^4 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

Усредним коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha = \frac{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3}{3} = 4.229 \cdot 10^4 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

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](#)

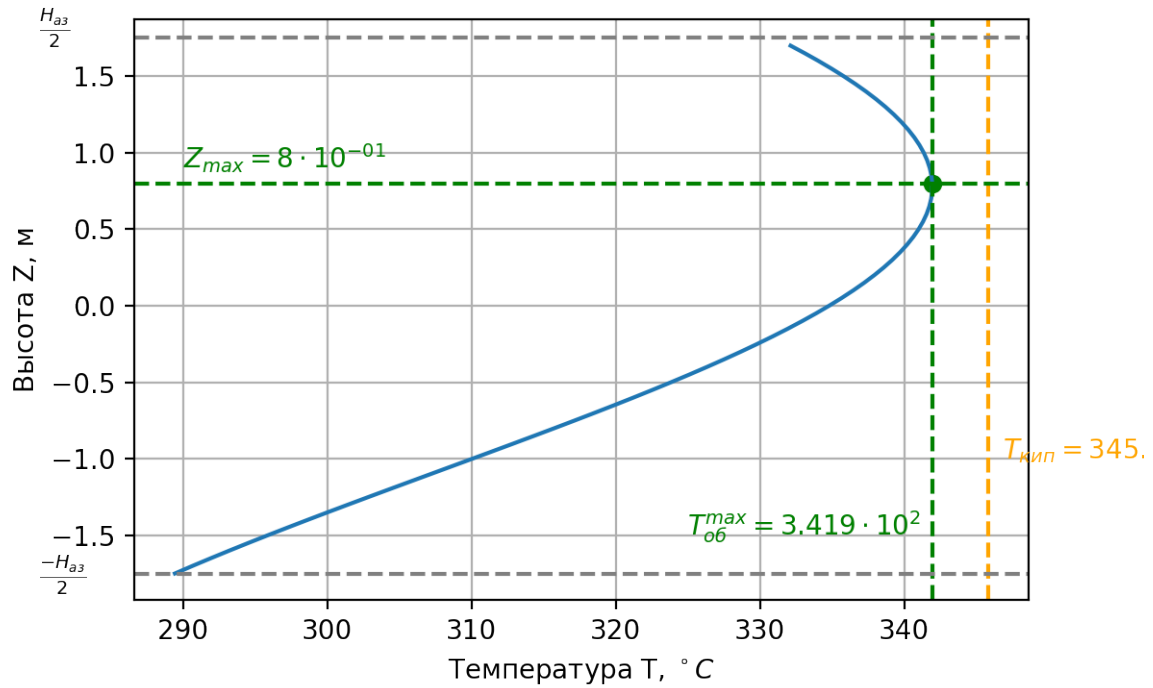


Рисунок 2.4. Изменение температуры стенки твэла по высоте

Из 2.4 видно, что максимальная температура  $T_{об}^{max} = 341.9^\circ C$  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

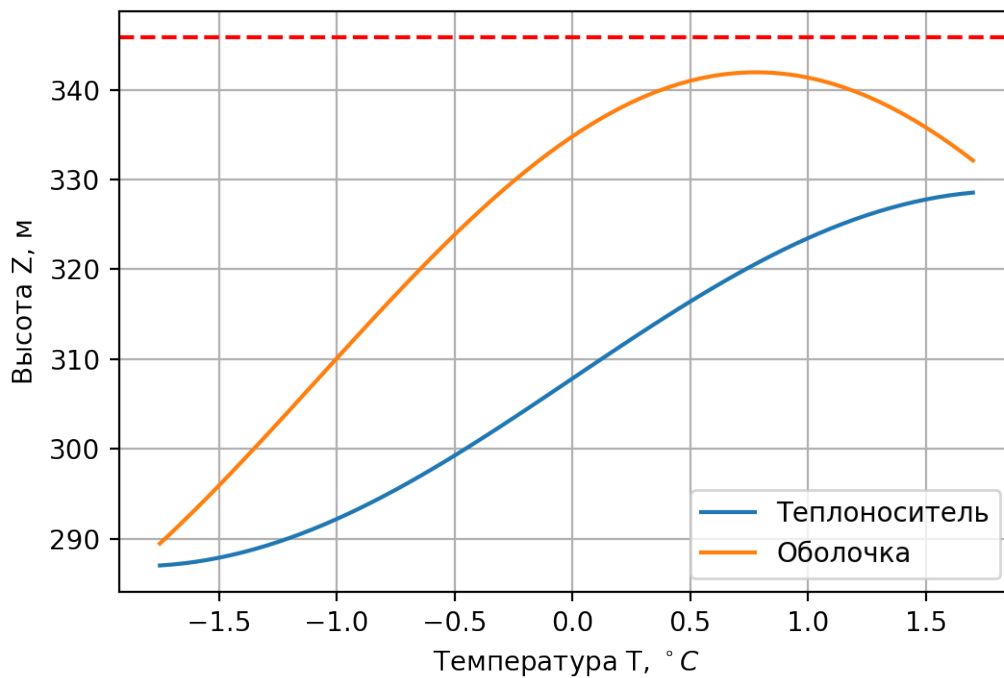


Рисунок 2.5. Изменение температуры стенки твэла и теплоносителя по высоте

## 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](#)

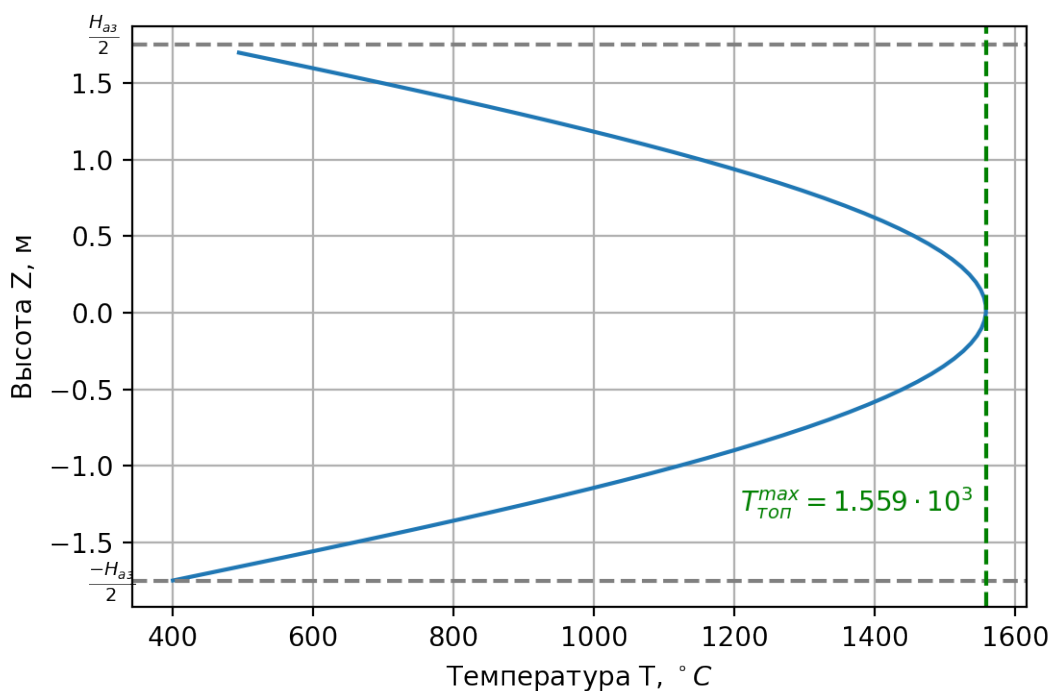


Рисунок 2.6. Изменение температуры топлива по высоте

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  $2600^{\circ}\text{C}$ . Однако в условиях нормальной эксплуатации максимально допустимая температура топлива определяется склонностью топлива к усиленному распуханию начиная с некоторой температуры, которая равна  $1041^{\circ}\text{C}$ .

## 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:

$$\Delta P_{\text{тр}} = \xi_{\text{тр}} \cdot \frac{H_{\text{аз}}}{d_{\text{т}}} \cdot \frac{w^2}{2} \rho_{\text{ср}} = 1.329 \cdot 10^{-02} \frac{3.500}{9.263 \cdot 10^{-03}} \cdot \frac{(5.600)^2}{2} \cdot 7.200 \cdot 10^2 = 5.671 \cdot 10^4 \text{Па}$$



где

- $w = 5.6 \frac{\text{м}}{\text{с}}$  — средняя скорость теплоносителя
- $\rho_{\text{ср}} = 720 \text{ Па}$  — средняя плотность среды

Потеря напора на ускорение:

$$\Delta P_{\text{уск}} = \left( \frac{G_{\text{реак}}}{N_{\text{ТВС}} \cdot S_{\text{прох}}} \right)^2 \cdot \left( \frac{1}{\rho_{\text{вых}}} - \frac{1}{\rho_{\text{вх}}} \right) = \left( \frac{1.710 \cdot 10^4}{1.630 \cdot 10^2 \cdot 2.402 \cdot 10^{-02}} \right)^2 \cdot \left( \frac{1}{6.808 \cdot 10^2} - \frac{1}{7.521 \cdot 10^2} \right) = 2.658 \cdot 10^3 \text{ Па}$$

, 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:

$$\Delta P_{\text{нив}} = \rho_{\text{ср}} \cdot g \cdot H_{\text{аз}} = 7.200 \cdot 10^2 \cdot 9.807 \cdot 3.500 = 2.471 \cdot 10^4 \text{ Па}$$

Местное сопротивление:

$$\Delta P_{\text{мест}} = \frac{\left( \frac{G}{N_{\text{ТВС}} \cdot S_{\text{прох}}} \right)^2}{2} \cdot \left( \frac{\xi_{\text{вх}}}{\rho_{\text{вх}}} + \frac{13\xi_{\text{реш}}}{\rho_{\text{ср}}} + \frac{\xi_{\text{вых}}}{\rho_{\text{вых}}} \right)$$

$$\Delta P_{\text{мест}} = \frac{\left( \frac{1.710 \cdot 10^4}{1.63 \cdot 2.402 \cdot 10^{-02}} \right)^2}{2} \cdot \left( \frac{2.6}{7.521 \cdot 10^2} + \frac{13 \cdot 0.45}{7.200 \cdot 10^2} + \frac{0.26}{6.808 \cdot 10^2} \right) = 1.142 \cdot 10^5 \text{ Па}$$

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:

$$\Delta P = \Delta P_{\text{тр}} + \Delta P_{\text{уск}} + \Delta P_{\text{нив}} + \Delta P_{\text{мест}} = 1.983 \cdot 10^5 \text{ Па}$$

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

$$N_{\text{пр}} = 163 \cdot \frac{1.983 \cdot 10^5 \cdot 1.049 \cdot 10^2}{0.8 \cdot 7.521 \cdot 10^2} = 5.635 \cdot 10^6 \text{ Вт}$$

КПД реактора с учетом потерь на прокачку теплоносителя:

$$\eta' = \frac{Q_{\text{эл}} - N_{\text{пр}}}{Q_{\text{теп}}} = \frac{1.000 \cdot 10^9 - 5.635 \cdot 10^6}{3.146 \cdot 10^9} = 3.161 \cdot 10^{-01}$$

## 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 0.316 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  $341.9^{\circ}\text{C}$  не превышает предельно допустимую.
3. Определена зависимость температуры топлива от высоты АЗ, максимальная температура топлива  $1559^{\circ}\text{C}$  не превышает предельное значение  $1900^{\circ}\text{C}$ .

## 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 <sub>2</sub>
Обогащение топлива, %	4.7
Плотность топлива, г/см <sup>3</sup>	9.015
Количество циклов перегрузки топлива	3
Состав оболочки	99%Zr + 1%Nb
Замедлитель	H <sub>2</sub> 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

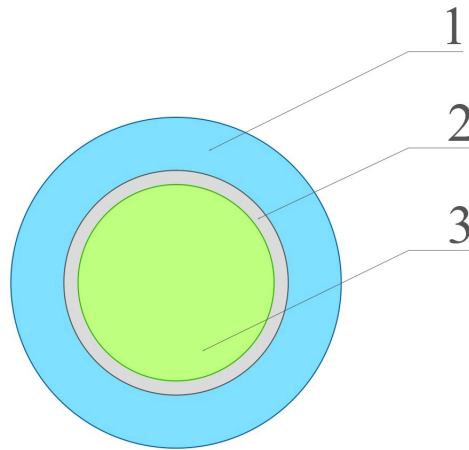


Рисунок 3.1. Геометрия элементарной топливной ячейки. 1 — замедлитель, 2 — оболочка, 3 — топливо

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  $K_{\infty}$  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
$K_{\infty}$ 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 <sup>38</sup>	1.97
Pu <sup>39</sup>	55.18
Pu <sup>40</sup>	21.35
Pu <sup>41</sup>	15.59
Pu <sup>42</sup>	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