

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
2021

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	13
2.9. Определение перепадов давления и необходимой мощности насосов на прокачку	14
2.10. Выводы из теплофизического расчета	15

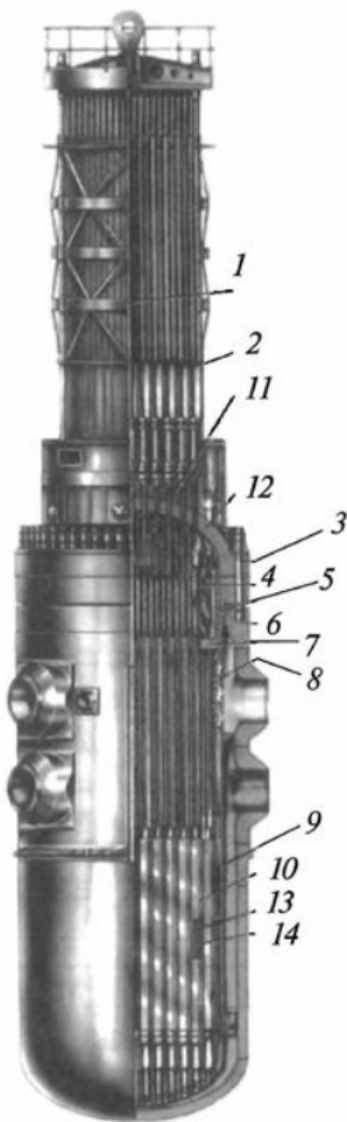
1. Описание конструкции реактора

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, $^\circ\text{C}$	281
Давление свежего пара	6.5
Температура пара после пароперегревателей, $^\circ\text{C}$	250
Давление в АЗ, МПа	15.7
Степень сухости пара прсле ЦВД и ЦНД, %	80
Количество петель РУ	4
Число ТВС $N_{\text{ТВС}}$, шт	163
Число твэл в ТВС $N_{\text{ТВЭЛ}}$, шт	317
Коэффициент неравномерности по высоте АЗ	1.5
Коэффициент неравномерности по радиусу АЗ	1.25
Высота АЗ $H_{\text{АЗ}}$, м	3.5
Диаметр твэл $d_{\text{ТВ}}$, мм	9.1
Размер ТВС «под ключ» a , мм	234
Диаметр центрального канала в ТВС $D_{\text{ц.к.}}$, мм	10.3
Число направляющих каналов в ТВС $N_{\text{н.к.}}$, шт	12
Шаг решетки ТВС S_m , мм	12,75
Диаметр направляющего канала в ТВС $D_{\text{н.к.}}$, мм	12.6
Толщина оболочки твэл $\delta_{\text{ТВЭЛ}}$, мм	0.65
Толщина газового зазора в твэл $\delta_{\text{г}}$, 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	281
Давление свежего пара, °C	6.5
Температура после промежуточного перегрева, °C	250
Количество регенеративных подогревателей	7

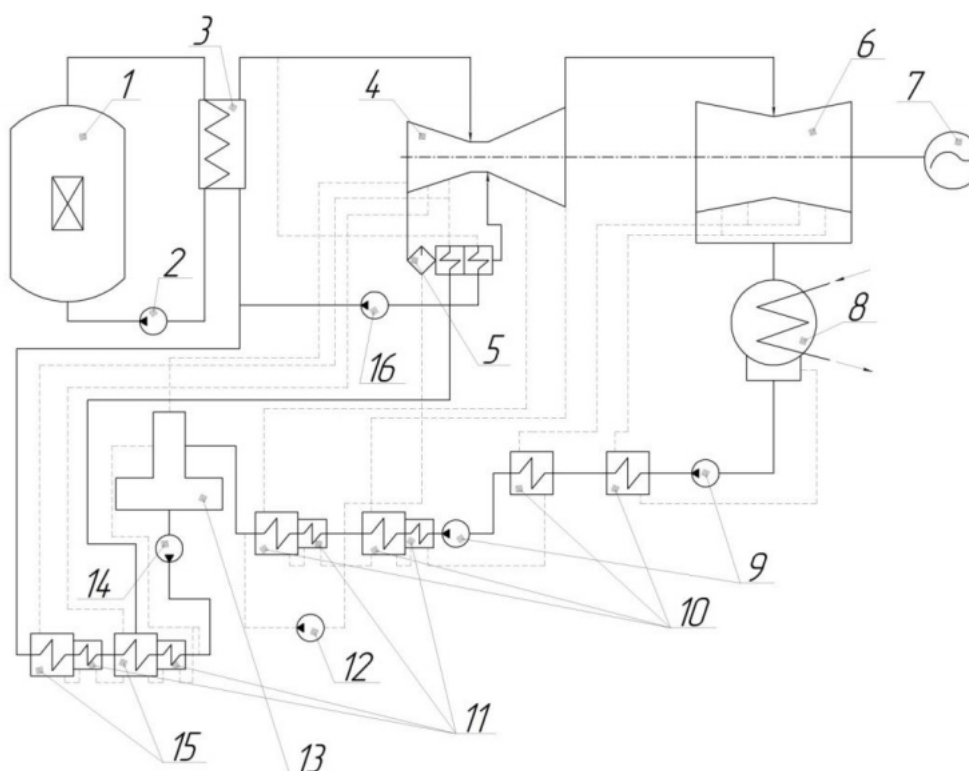


Рисунок 2.1. Тепловая схема АЭС: 1 – ядерный реактор, 2 – главный циркуляционный насос, 3 – парогенератор, 4 – цилиндр высокого давления, 5 – сепаратор-пароперегреватель, 6 – цилиндры низкого давления, 7 – генератор, 8 – конденсатор, 9 – конденсационный электронасос, 10 – подогреватель низкого давления,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

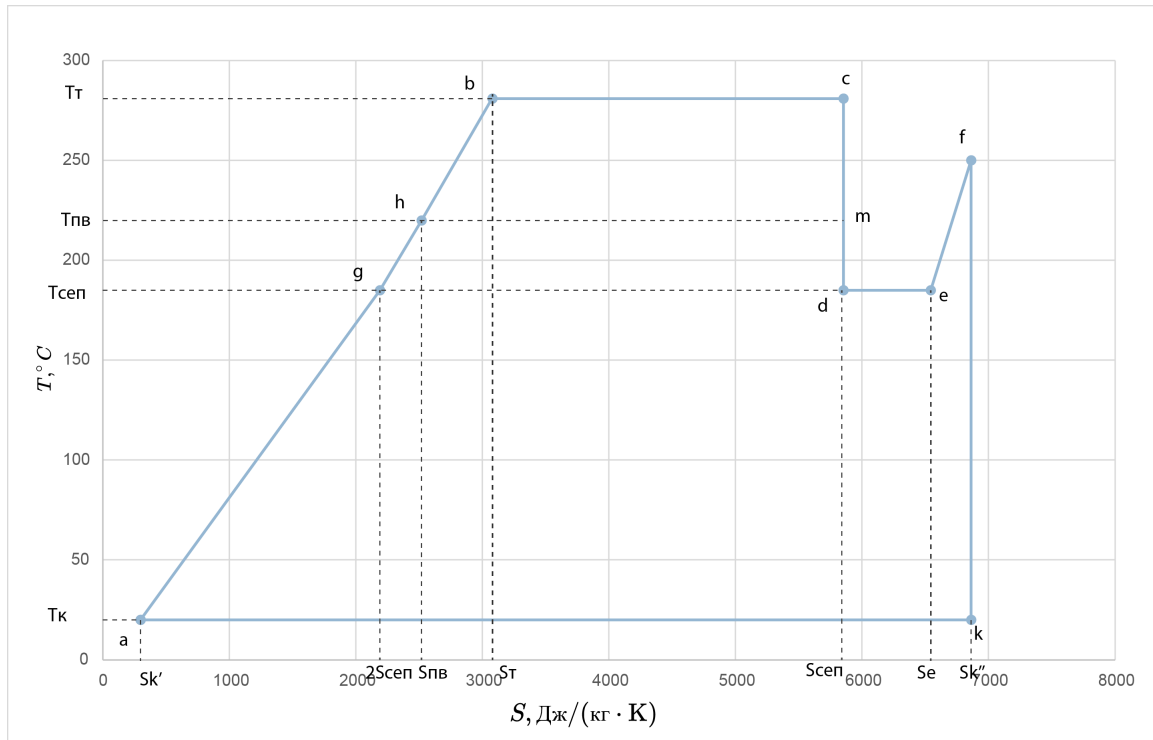


Рисунок 2.2. TS диаграмма турбинного цикла в реакторе ВВЭР1000 : hbc — нагрев и испарение в парогенераторе; cd — расширение пара в ЦВД; de — паротделяется от конденсата в сепараторе; ef — пар поступает в промежуточный пароперегреватель; fk — расширение пара в ЦНД; ka — конденсация в конденсаторе; ag — регенеративный подогрев в ПНД; gh — регенеративный подогрев в ПВД

Таблица 2.3: Значения параметров TS-диаграммы

Точка	P, МПа	T, °C	S, Дж/(кг*K)	h, кДж/кг
h	2.6	220	2517	943.7
b	6.5	281	3076	2780
c	6.5	281	5852	2779
d	1.13	185	5852	2465
e	1.13	185	6543	2782
f	1.13	250	6863	2938
k	0.0023	20	6863	1998
k'	0.0023	20	295.2	83.92
a	6.5	20	295.2	90
g	1.13	185	2188	785.3

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

$$\eta_{t0} = 1 - \frac{T_k \cdot (s_f - s_a) \cdot x_d}{(h_c - h_g) + x_d((h_g - h_a) + (h_f - h_e))} = 0.424$$

Термический КПД с идеальной регенерацией:

$$\eta_{t\infty} = 1 - \frac{T_k \cdot (s_f - s_g)(s_c - s_h)}{(h_c - h_h) \cdot (s_e - s_g) + (h_f - h_e) \cdot (s_f - s_h)} = 0.473$$

Термический КПД с $n = 7$ регенеративными отборами:

$$\eta_{tn} = \eta_{t0} + (\eta_{t\infty} - \eta_{t0}) \cdot \frac{n}{n+1} = 0.467$$

Учитываем: $\eta^{\text{BH}} = 0.85$ — внутренний КПД турбины; $\eta_{\text{oc}} = 0.98$ — 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:

$$\eta_{\text{брутто}} = \eta^7 \cdot \eta^{\text{BH}} \cdot \eta_{\text{oc}} \cdot \eta_{\text{эГ}} \cdot \eta_{\text{мех}} = 0.37$$

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

$$Q_{\text{теп}} = \frac{Q_{\text{эл}}}{\eta_{\text{брутто}}} = 2700$$

2.5. Расчет изменения теплового потока в наиболее нагруженном канале

Из условия $K_z = \frac{1}{\int_{-H_{аз}/2}^{H_{аз}/2} \cos\left(\frac{\pi \cdot z}{H_{эф}}\right) dz} = 1.5$ находим эффективную добавку к высоте активной зоны. Эффективная высота активной зоны будет равна $H_{эф} = 2.66$ м. Максимальная величина теплового потока на один ТВЭЛ:

$$q_{max} = \frac{Q_{теп} K_r K_z}{N N_{ТВЭЛ} H_{аз}} = 279.93 \frac{\text{Вт}}{\text{см}}$$

Зависимость величины теплового потока от высоты:

$$q(z) = q_{max} \cos\left(\frac{\pi \cdot z}{H_{эф}}\right) = 279.93 \cos\left(\frac{\pi \cdot z}{266}\right) \left[\frac{\text{Вт}}{\text{см}}\right]$$

2.6. Расчет распределения температуры теплоносителя по высоте

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

Энтальпия выхода $h_{вых} = 1.453 \cdot 10^6$.

Расход теплоносителя через ТВС:

$$G = \frac{Q_{теп}}{(h_{вых} - h_{вх}) N_{ТВС}} = 89.67 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

Расход теплоносителя через реактор:

$$G_{реак} = \frac{Q_{теп}}{(h_{вых} - h_{вх})} = 14615.6 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

Средняя теплоемкость воды:

$$C_p = \frac{h_{вых} - h_{вх}}{T_{вых} - T_{вх}} = 5606.06 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

Распределение температуры теплоносителя по высоте реактора:

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

Отсюда максимальная температура жидкости $T_{ТН}^{max} = 315.092$ °C. График изменения температуры теплоносителя по высоте представлен на [2.3](#)

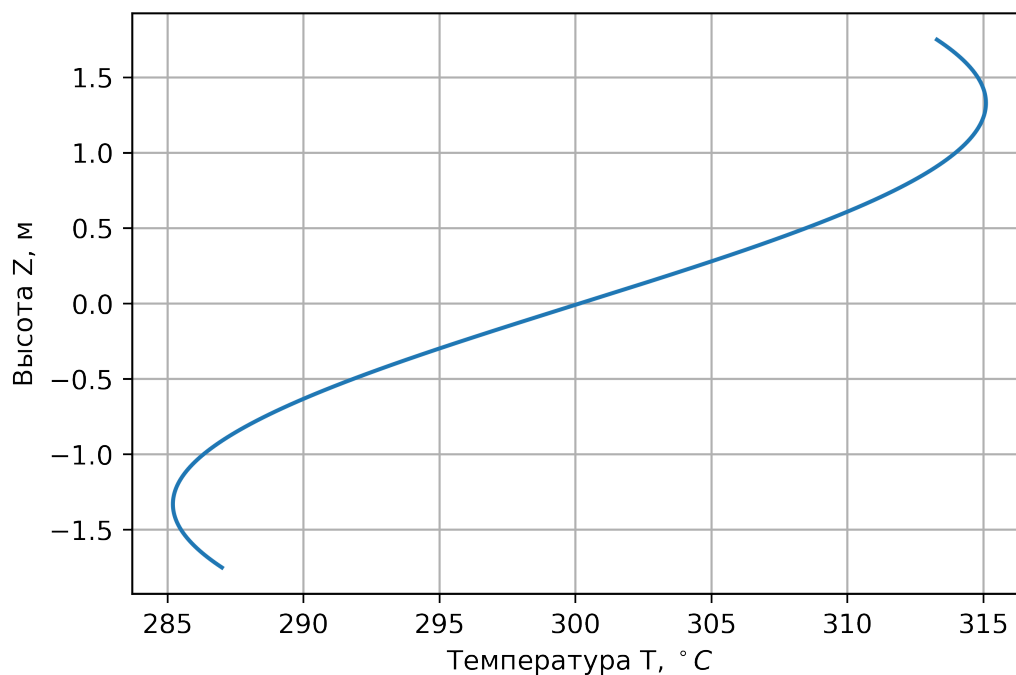


Рисунок 2.3. Изменение температуры теплоносителя по высоте

Максимальная температура теплоносителя определяется из температуры кипения теплоносителя при давлении в активной зоне. Температура насыщения воды при давлении 15.7 МПа — 345.8 °C. Отсюда следует что запас до кипения $\approx 31^\circ\text{C}$.

2.7. Расчет распределения температуры внешней стенки оболочки по высоте

Площадь проходного сечения:

$$S_{\text{прох}} = \sqrt{3}/2(a - 2 \cdot \delta)^2 - N_{\text{ТВЭЛ}} \frac{\pi d_{\text{ТВ}}^2}{4} - N_{\text{н.к.}} \frac{\pi D_{\text{н.к.}}^2}{4} - \frac{D_{\text{ц.тр}}^2 \pi}{4} = 2.4 \cdot 10^4 \text{ мм}^2$$

Периметр:

$$\Pi = (2(a - 2\delta)\sqrt{3}) - N_{\text{ТВЭЛ}} \pi d_{\text{ТВ}} + N_{\text{н.к.}} \pi D_{\text{н.к.}} + \pi D_{\text{ц.к.}} = 10370 \text{ мм}$$

Гидравлический диаметр:

$$d_{\Gamma} = \frac{4S_{\text{прох}}}{\Pi} = 9.26 \text{ мм}$$

Определим коэффициент теплоотдачи в режиме турбулентного стационарного течения несжимаемой жидкости. По формуле Б.С.Петухова, В.В. Кирил-

лова: Число Рейнолдса:

$$Re = \frac{G_{\text{pear}} \cdot d_r}{N_{\text{TBC}} \cdot S_{\text{прох}} \cdot \mu} = 5.15 \cdot 10^5$$

Коэффициент гидравлического сопротивления:

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

Расчитываем число Нуссельта:

$$Nu = \frac{\frac{\xi}{8} \cdot Re \cdot Pr}{k + 12.7 \cdot \left(Pr^{\frac{2}{3}} - 1\right) \cdot \sqrt{\frac{\xi}{8}}} = 976.059$$

Коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha_1 = \frac{Nu \lambda_{\text{cp}}}{d_r} = 4.71 \cdot 10^4 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

По формуле Диттуса-Болтера:

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} = 973.598$$

Коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha_2 = \frac{Nu \lambda_{\text{cp}}}{d_r} = 4.69 \cdot 10^4 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

По формула М.А. Михеева:

$$Nu = 0.021 Re^{0.8} Pr^{0.43} = 897.762$$

Коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha_3 = \frac{Nu \lambda_{\text{cp}}}{d_r} = 4.33 \cdot 10^4 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

Усредним коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha = \frac{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3}{3} = 4.58 \cdot 10^4 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

Распределение температуры внешней стенки твэла по высоте реактора:

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

Распределение температуры внешней стенки твэла по высоте реактора представлено на 2.4

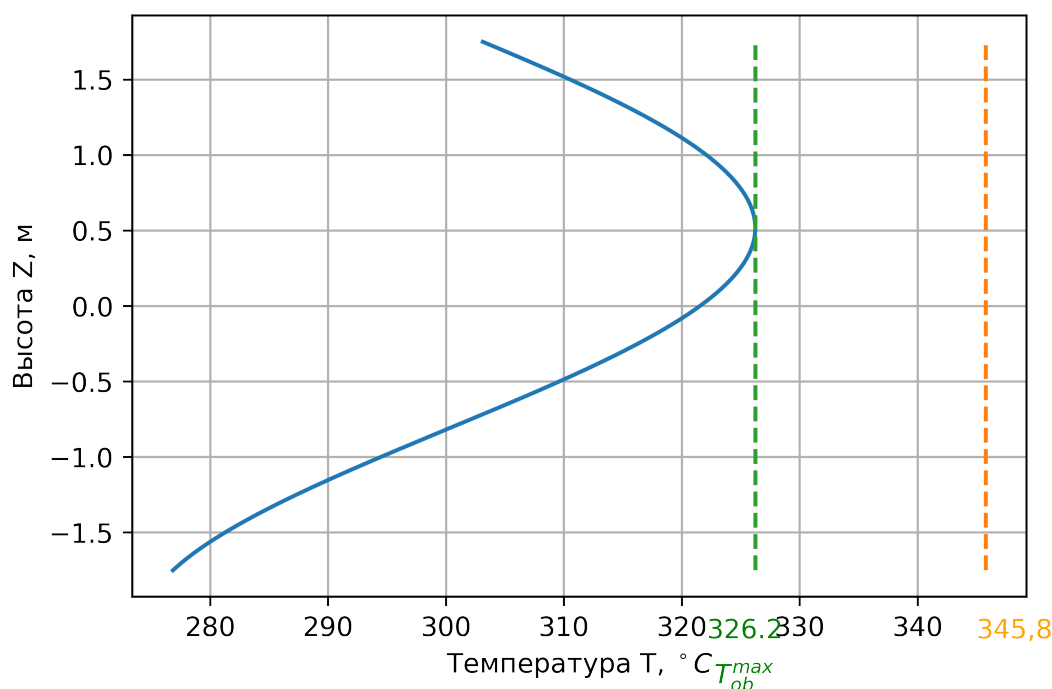


Рисунок 2.4. Изменение температуры стенки твэла по высоте

Из 2.4 видно, что максимальная температура $T_{об}^{max} = 326.2^{\circ}C$ стенки достигается в $Z_{max} = 0.517$. Отсюда можно сделать вывод о том, что также отсутствует поверхностное кипения теплоносителя.

2.8. Расчет температуры топлива

Произведём расчет термического сопротивления оболочки, газового зазора и топлива:

$$\sum R_i = \frac{\ln \frac{d_{тв}}{d_{тв}-2\delta}}{2\pi\lambda_{об}} + \frac{\ln \frac{d_{тв}-2\delta}{d_{топ}}}{2\pi\lambda_{г.з}} + \frac{\frac{1}{2} - \frac{d_{отв}^2}{d_{топ}^2 - d_{отв}^2} \ln \frac{d_{топ}}{d_{отв}}}{2\pi\lambda_{топ}} = 0.04 \frac{\text{м} \cdot \text{К}}{\text{Вт}}$$

где

- $\lambda_{г.з.} = 0.35 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ — теплопроводность газового слоя
- $\lambda_{об} = 23 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ — теплопроводность оболочки
- $\lambda_{топ} = 3 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ — теплопроводность топлива
- $\delta_{г.з} = \frac{d_{твэл}-2\delta_{об}-d_{топ}}{2} = 3 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ — толщина газового зазора

Распределение температур в топливе по высоте активной зоны:

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

График изменения температуры топлива по высоте представлен на [2.5](#)

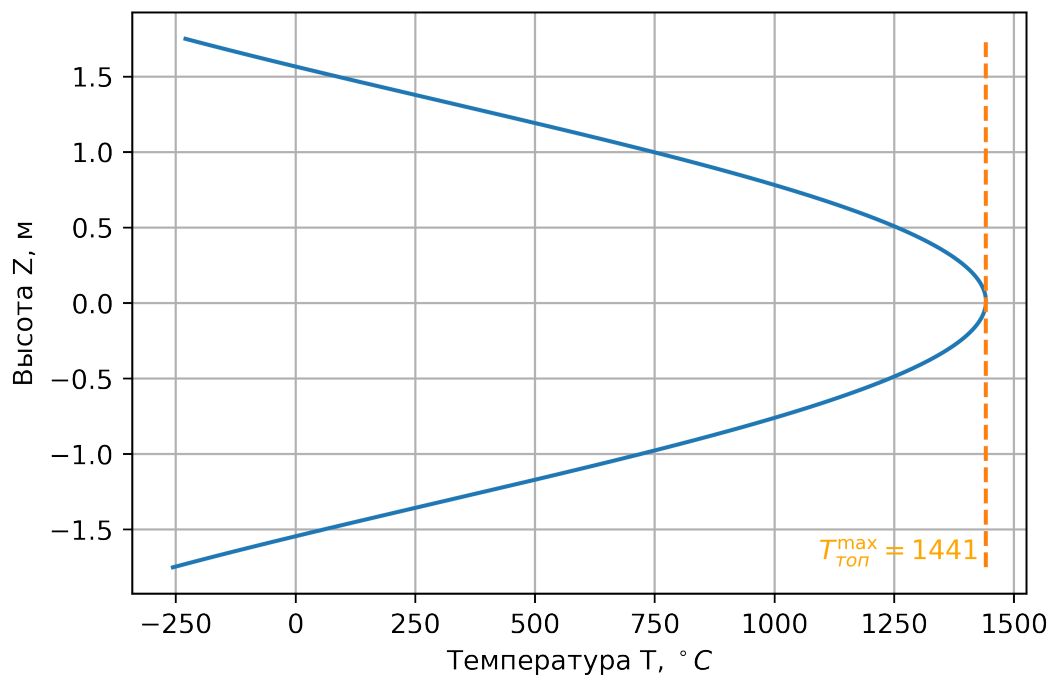


Рисунок 2.5. Изменение температуры топлива по высоте

Максимальная температура топлива $T_{\text{топ}} = 1441^{\circ}\text{C}$ при $Z_{\text{max}} = 0.012\text{м}$. 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 начиная с некоторой температуры, которая равна 1990°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:

$$\Delta P_{\text{тр}} = \frac{1}{2d_r} \cdot \left(\frac{G_{\text{ТВС}}}{N_{\text{ТВС}} S_{\text{прох}}} \right)^2 \cdot \frac{\xi_{\text{тр}}}{\rho_{\text{ср}}} = 1.363 \cdot 10^4 \text{Па}$$

Потеря напора на ускорение:

$$\Delta P_{\text{уск}} = \left(\frac{G}{N_{\text{ТВС}} \cdot S_{\text{прох}}} \right)^2 \cdot \left(\frac{1}{\rho_{\text{ВЫХ}}} - \frac{1}{\rho_{\text{ВХ}}} \right) = 1.94 \cdot 10^3 \text{ Па}$$

, 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:

$$\Delta P_{\text{нив}} = (\rho_{\text{ВХ}} - \rho_{\text{ВЫХ}}) \cdot g \cdot H_{\text{аз}} = 2.45 \cdot 10^3 \text{ Па}$$

Местное сопротивление:

$$\Delta P_{\text{мест}} = \frac{\left(\frac{G}{N_{\text{ТВС}} \cdot S_{\text{прох}}} \right)^2}{2} \cdot \left(\frac{\xi_{\text{ВХ}}}{\rho_{\text{ВХ}}} + \frac{13\xi_{\text{реш}}}{\rho_{\text{ср}}} + \frac{\xi_{\text{ВЫХ}}}{\rho_{\text{ВЫХ}}} \right) = 6.17 \cdot 10^4 \text{ Па}$$

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

$$\Delta P = \Delta P_{\text{тр}} + \Delta P_{\text{уск}} + \Delta P_{\text{нив}} + \Delta P_{\text{мест}} = 6.97 \cdot 10^4 \text{ Па}$$

Мощность, необходимая для прокачки теплоносителя через весь реактор:

$$N_{\text{пр}} = N_{\text{ТВС}} \frac{\Delta P \cdot G_{\text{ТВС}}}{\eta_{\text{нас}} \cdot \rho_{\text{ВХ}}} = 1.937 \cdot 10^6 \text{ Вт}$$

КПД реактора с учетом потерь на прокачку теплоносителя:

$$\eta' = \frac{Q_{\text{эл}} - N_{\text{пр}}}{Q_{\text{теп}}} = 0.369$$

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 0.369 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 ТВЭЛ 326.2 °C не превышает предельно допустимую.
3. Определена зависимость температуры топлива от высоты АЗ, максимальная температура топлива 1441 °C не превышает предельное значение 1900 °C.