

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

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. Расчет биологической защиты	19
3.1. Постановка задачи	19
3.2. Построение расчетной модели биологической защиты	19

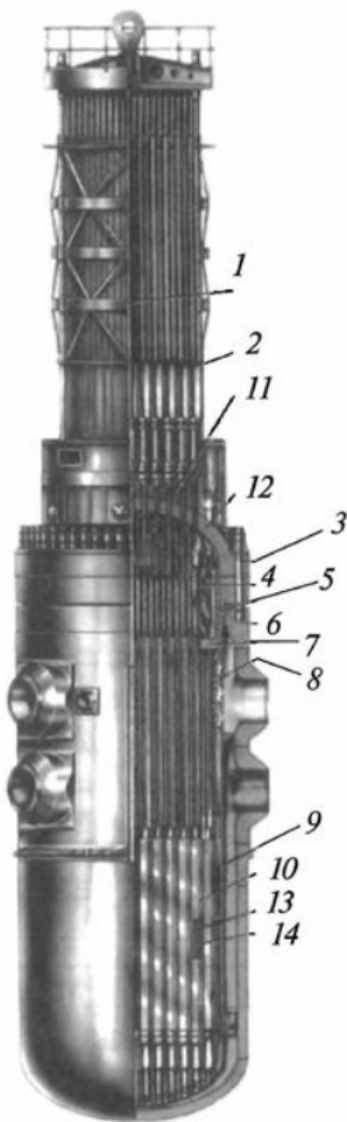
1. Описание конструкции реактора

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 ценой реакции деления ядер урана, преобразуется в тепловую энергию теплоносителя первого контура. Далее нагретый теплоноситель поступает с помощью тепловых насосов в парогенераторы, где происходит отдача тепла воде второго контура. Образовавшийся в парогенераторах пар далее поступает в паротурбинную установку, приводящую в движение турбогенератор, который вырабатывает электроэнергию.

После передачи энергии в парогенераторах вода первого контура поступает в реактор через нижний ряд напорных патрубков. Сплошная кольцевая перегородка между рядами нижних и верхних патрубков, дистанцирующая корпус реактора и его шахту, формирует движение потока теплоносителя вниз. Поэтому вода проходит вниз по кольцевому зазору между корпусом и 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 ТВЭЛ, 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. Расчёт перепадов давлений и мощности, необходимой на прокачку теплоносителя;
7. Расчёт 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

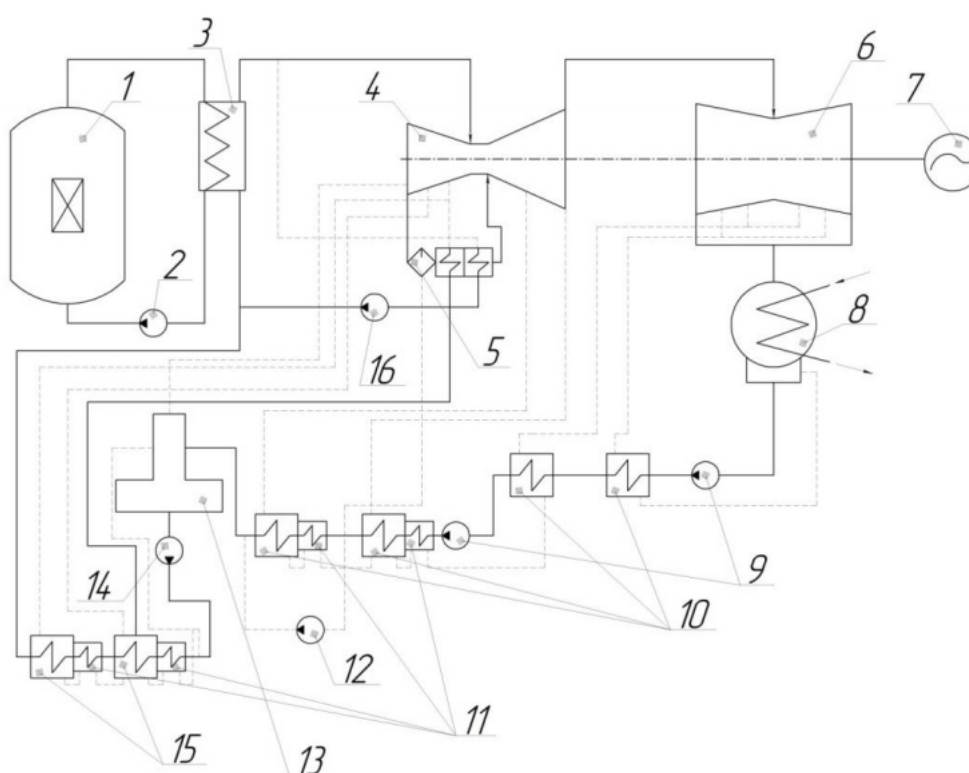


Рисунок 2.1. Тепловая схема АЭС: 1 – ядерный реактор, 2 – главный циркуляционный насос, 3 – парогенератор, 4 – цилиндр высокого давления, 5 – сепаратор-пароперегреватель, 6 – цилиндры низкого давления, 7 – генератор, 8 – конденсатор, 9 – конденсационный электронасос, 10 – подогреватель низкого давления,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

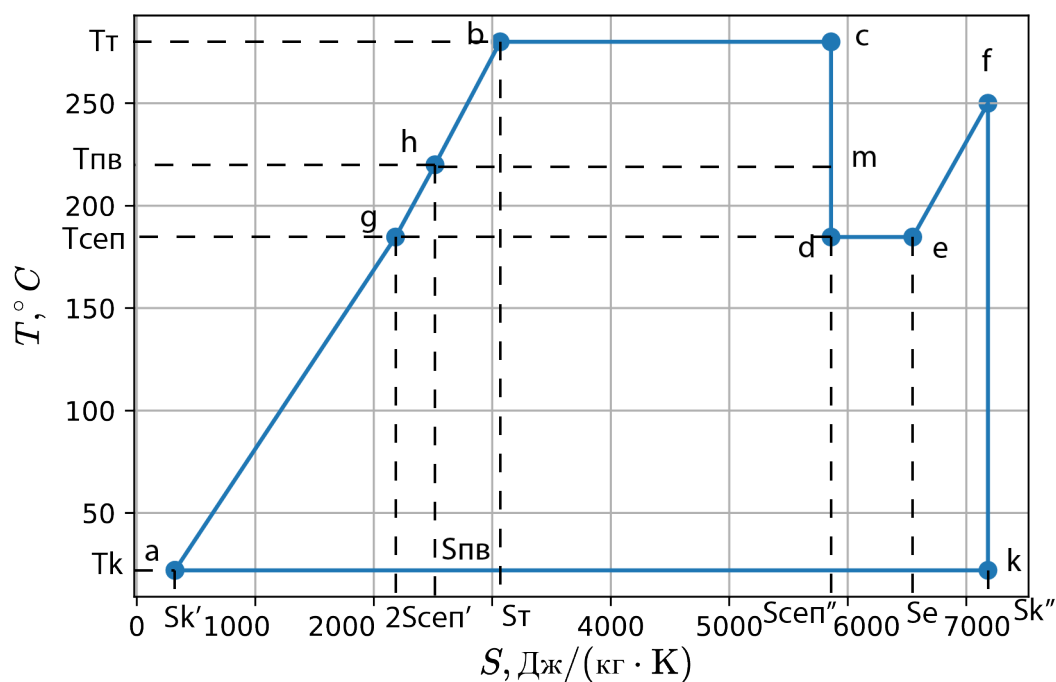


Рисунок 2.2. TS диаграмма турбинного цикла в реакторе ВВЭР-1000 : hbc — нагрев и испарение в парогенераторе; cd — расширение пара в ЦВД; de — пар отделяется от конденсата в сепараторе; ef — пар поступает в промежуточный пароперегреватель; fk — расширение пара в ЦНД; ka — конденсация в конденсаторе; ag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

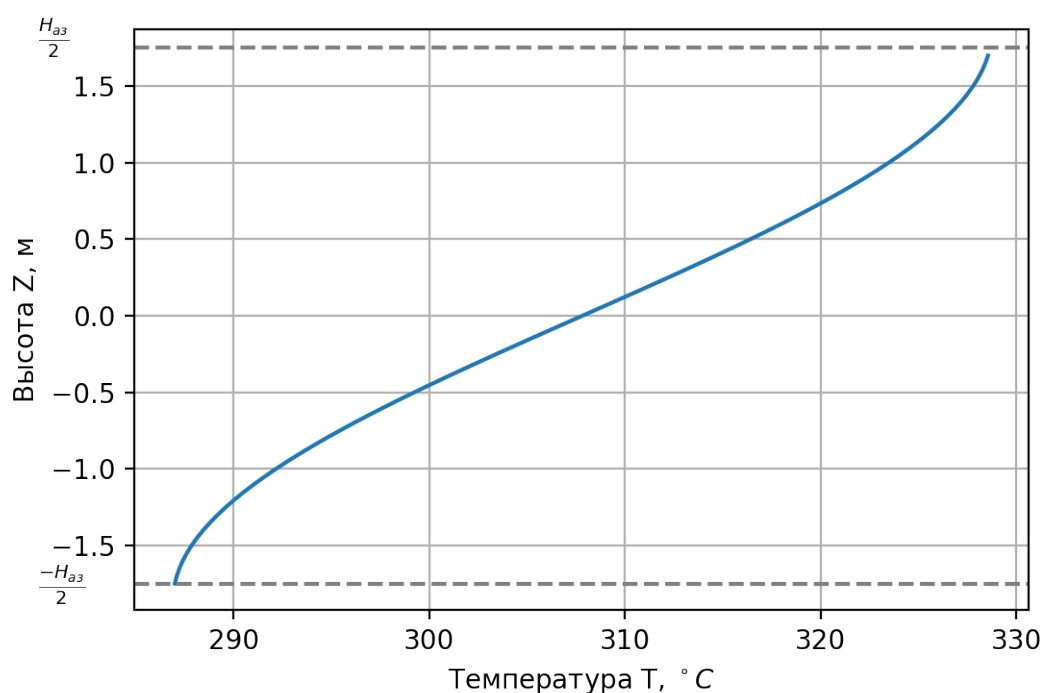


Рисунок 2.3. Изменение температуры теплоносителя по высоте

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 Рейнолдса:

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

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](#)

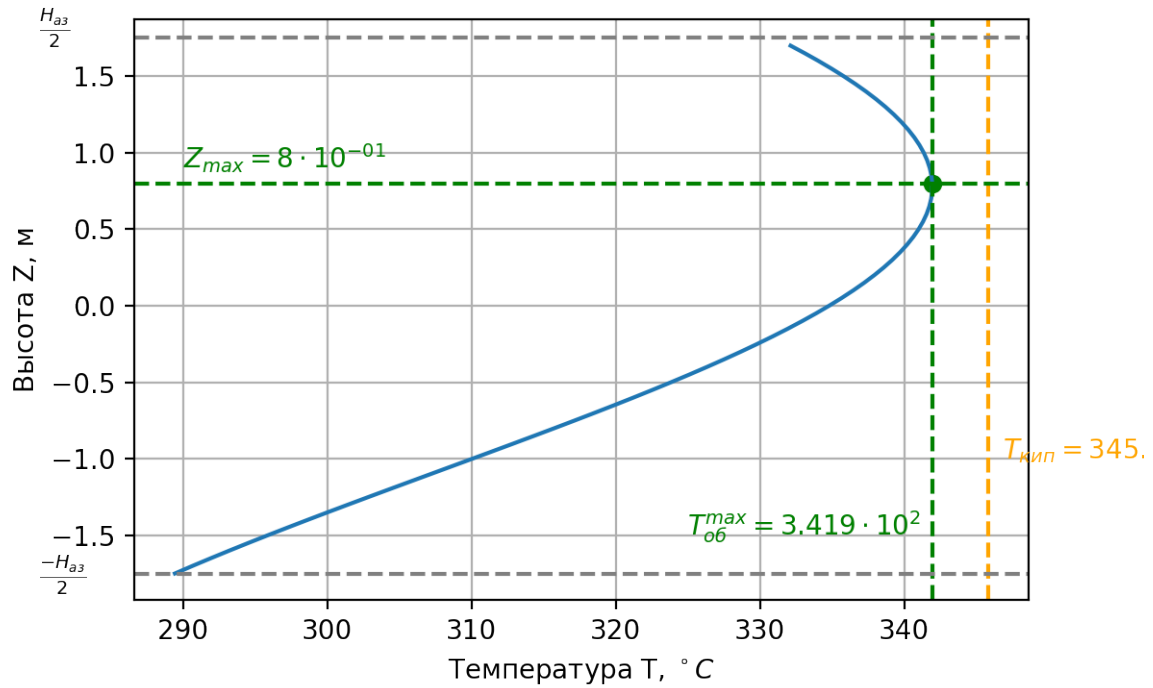


Рисунок 2.4. Изменение температуры стенки твэла по высоте

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

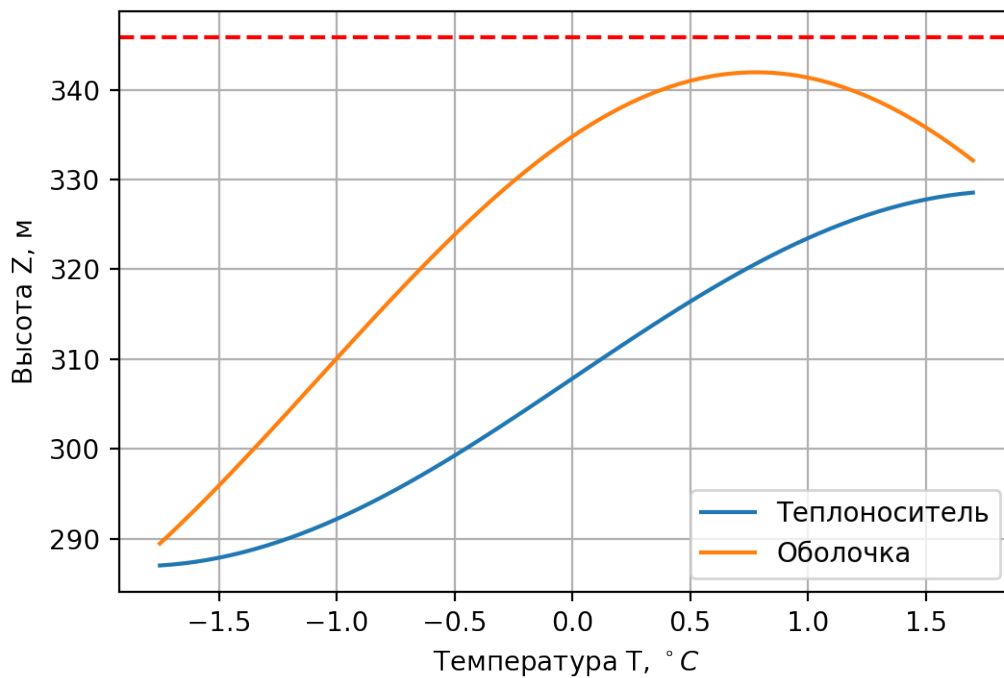


Рисунок 2.5. Изменение температуры стенки твэла и теплоносителя по высоте

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](#)

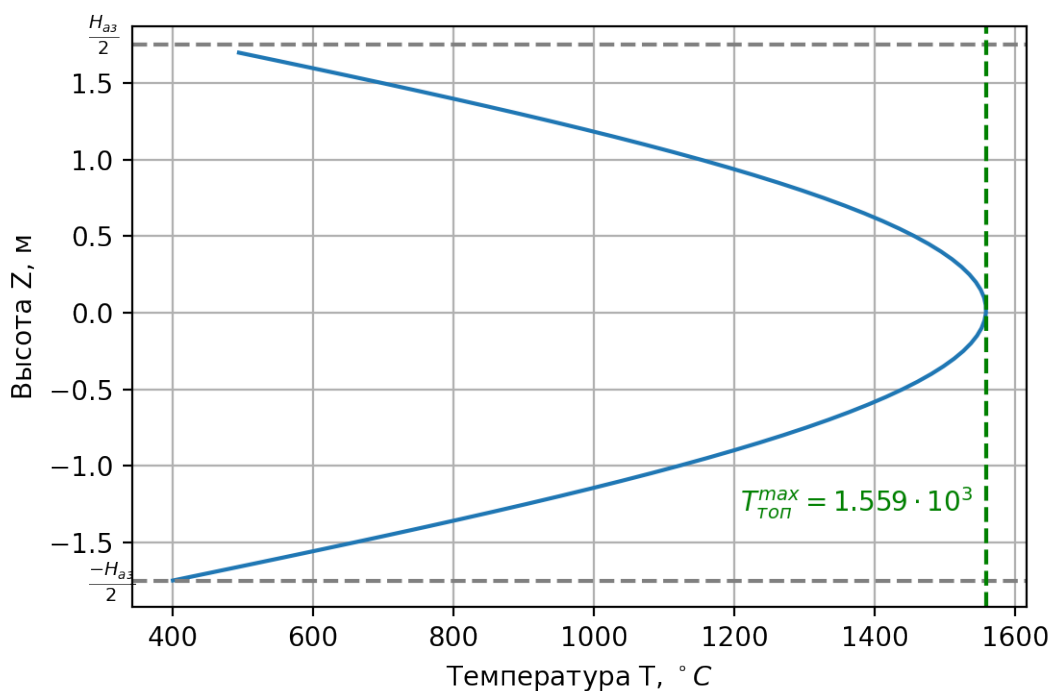


Рисунок 2.6. Изменение температуры топлива по высоте

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 начиная с некоторой температуры, которая равна 1041°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°C не превышает предельно допустимую.
3. Определена зависимость температуры топлива от высоты АЗ, максимальная температура топлива 1559°C не превышает предельное значение 1900°C .

3. Расчет биологической защиты

3.1. Постановка задачи

Необходимо рассчитать дозу облучения при стационарном режиме работы ЯЭУ ВВЭР-1000 за биологической защитой

3.2. Построение расчетной модели биологической защиты

Для формирования расчетной модели рассмотрим компоновку элементов и помещений ЯЭУ с РУ ВВЭР-1000.

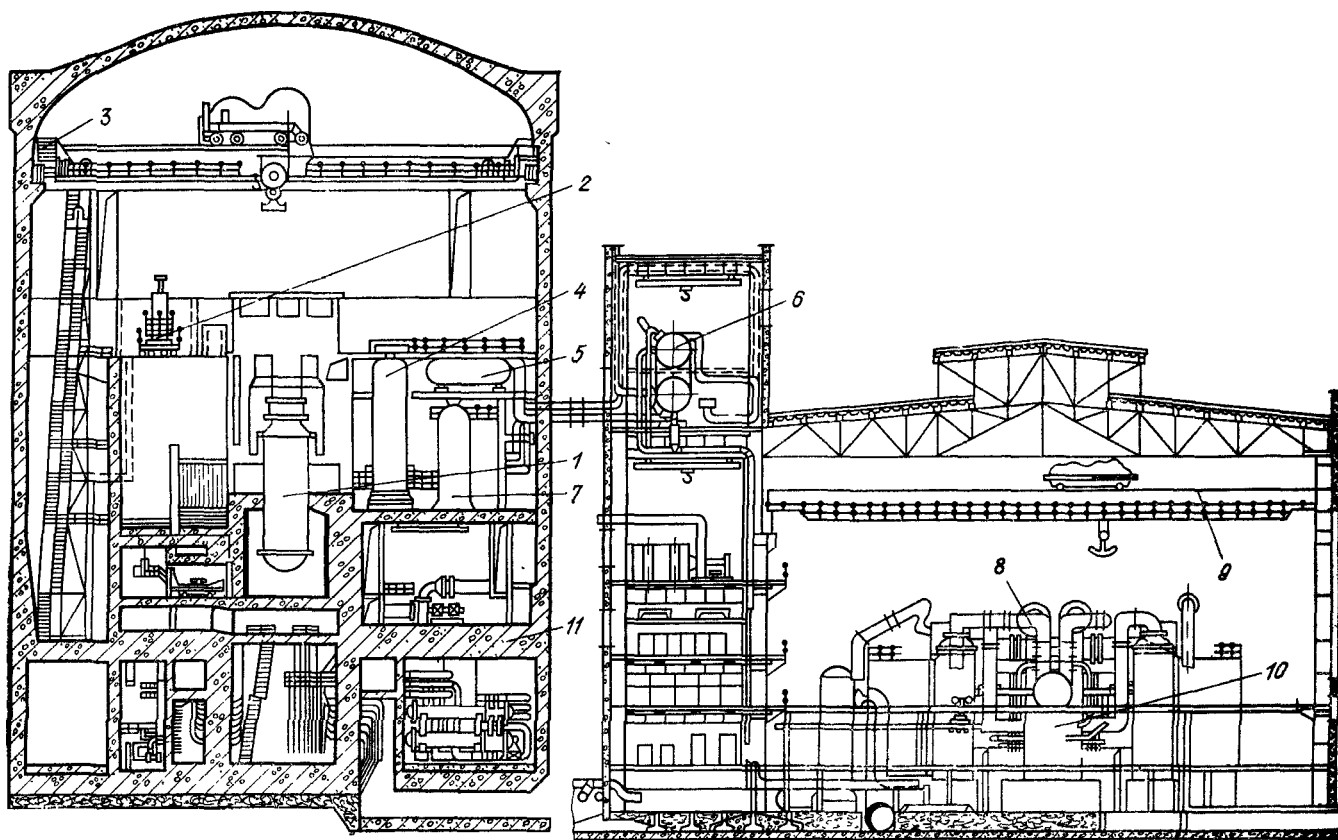


Рисунок 3.1. Общая компоновка энергоблока с РУ ВВЭР-1000 (Южно-Украинская АЭС):

1 — реактор; 2 — машина для перегрузки топлива; 3 — подъемный кран реакторного отделения; 4 — компенсатор давления, 5 — барботер; 6 — деаэратор; 7 — гидроемкость, 8 — турбогенератор; 9 — подъемный кран машинного зала; 10 — регенеративные подогреватели, 11 — защитная оболочка

Элементы компоновки вокруг реактора Рассмотрим основные элементы защиты, внешние по отношению к ВВЭР-1000 в сборе. Корпус реактора устанавливается в *бетонную шахту* [3.2], которая играет роль основной опоры и крепления реактора с учетом сейсмических нагрузок, а также биологической

защиты от излучения со стороны АЗ. Между корпусом реактора и шахтой имеется кольцевой зазор, предназначенный для периодического контроля металла корпуса в связи с требованиями правил. Шахта разделена по высоте на два объема разделительным сифоном:

- Верхний, снабжен гидрозатвором и соединяется с бассейном выдержки. При перегрузке верхний объем шахты вместе с бассейном заливается водой.
- Нижний, условно разделяемый фермой опорной на шахту зоны патрубков и шахту цилиндрической части корпуса. Соединяется проемом, снабженным герметичной дверью, с помещением для машины осмотра корпуса.

В помещении зоны патрубков биологическая защита выполнена из металлических коробов, заполненных специальным составом, в который входят серпентинитовая галька, кристаллический карбид бора, дробь чугуная литая. В районе активной зоны применяется «сухая» защита, которая представляет из себя слой серпентинитового бетона толщиной 720 мм и высотой 4,7 м, облицованного металлической оболочкой. Такой бетон обладает высокой радиационной стойкостью, что позволяет удовлетворить требования по нейтронной защите.

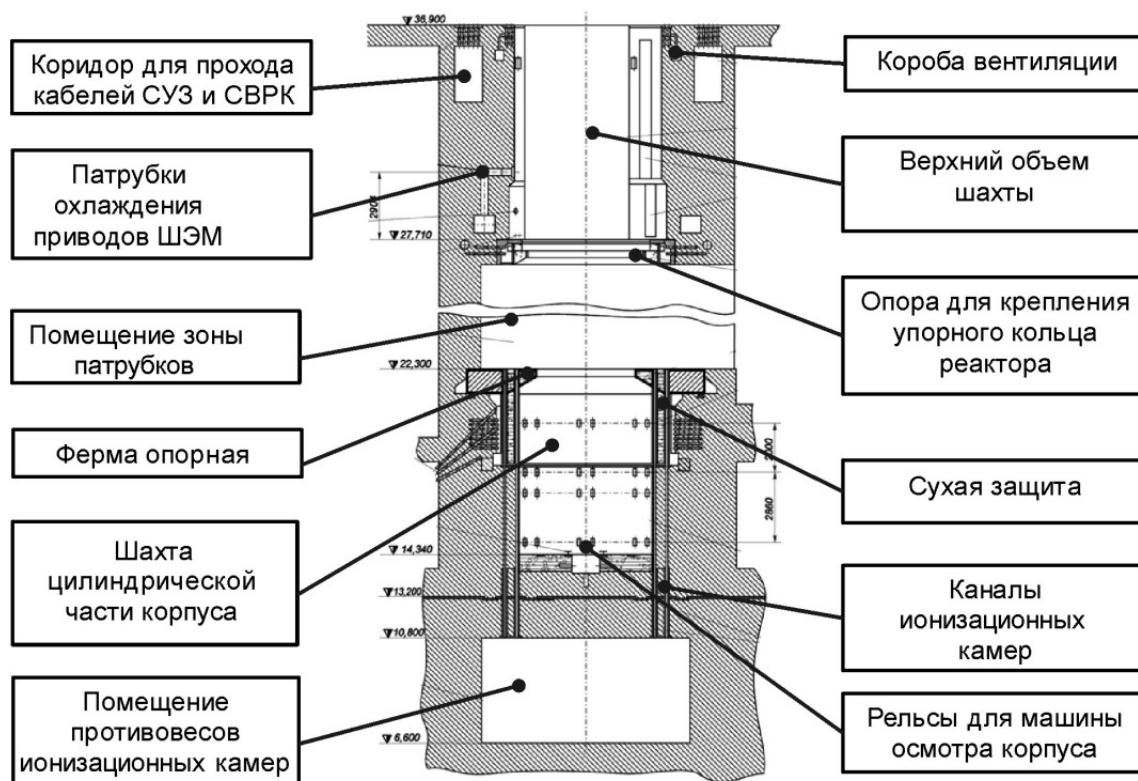


Рисунок 3.2. Бетонная шахта реактора

Все оборудование первого контура заключено в цилиндрическую оболочку, в верхней части которой расположен грузоподъемный поворотный кран. Между

реакторным и машинным залами располагается этажерка электротехнических устройств, где размещены также деаэраторы и различные лаборатории.

Активная зона

Внутрикорпусная шахта

Корпус

Бетонная шахта

Защитная оболочка