

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

Оценка характеристик биологической защиты ВВЭР-1000

Домашнее задание по курсу «Теория переноса излучений»

**Работу
выполнил:**
М. Д. Панин
Группа: Б18-101
Преподаватель:
М.Ю Терновых

Москва
2022

Содержание

1. Расчет биологической защиты	3
1.1. Постановка задачи	3
1.2. Построение расчетной модели биологической защиты	3
1.3. Расчет дозы нейтронов из активной зоны реактора	7
1.4. Расчет дозы нейтронов за защитой или минимального размера слоя биологической защиты для нейтронов	9
Перечень использованных источников	11

1. Расчет биологической защиты

1.1. Постановка задачи

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

1.2. Построение расчетной модели биологической защиты

Для формирования расчетной модели рассмотрим разомкнутую компоновку элементов и помещений ЯЭУ с РУ ВВЭР-1000. Такая компоновка предполагает разделения реакторного и машинного залов в разные здания, что позволяет локализовать возможную аварию и обеспечить большую безопасность.

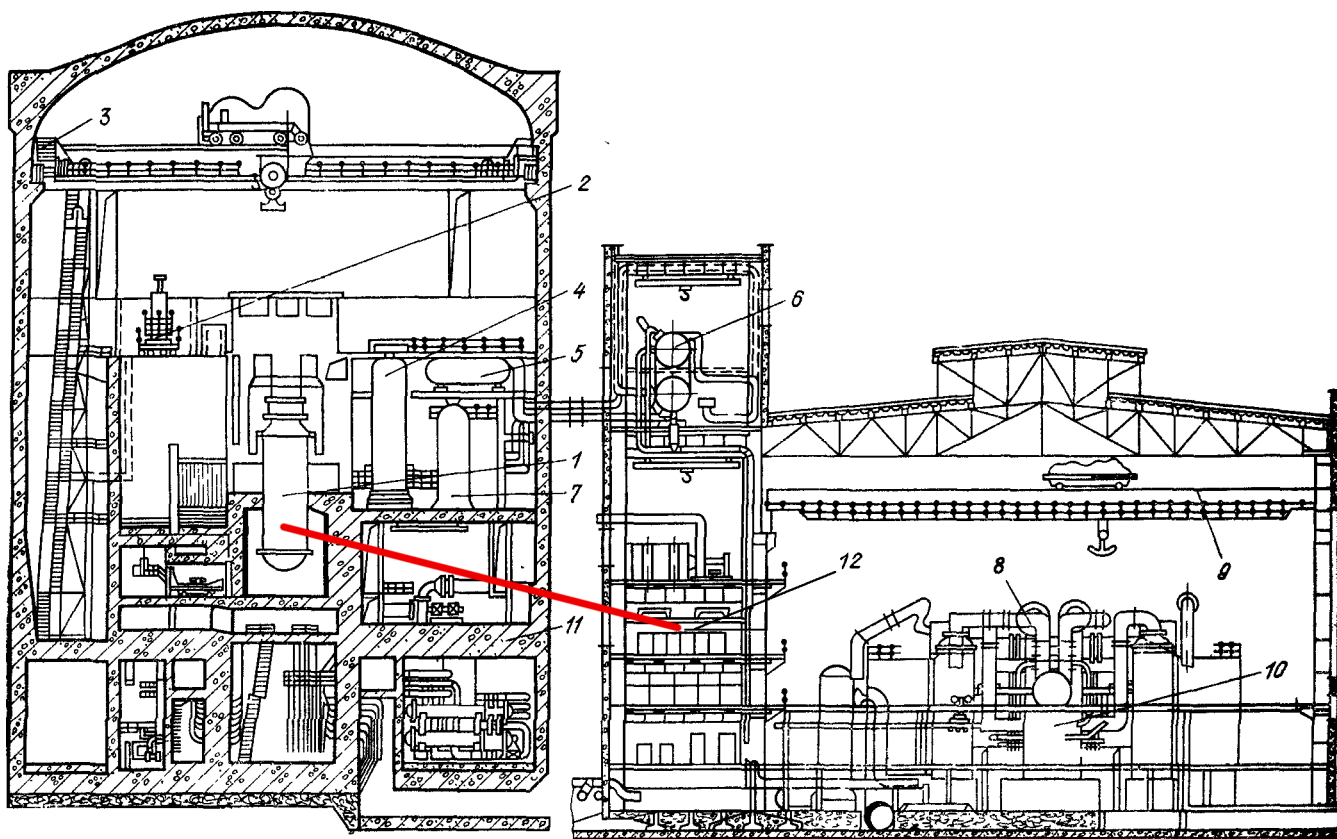


Рисунок 1.1. Общая компоновка энергоблока с РУ ВВЭР-1000 разомкнутой компоновки (Южно-Украинская АЭС) [2]:

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; 12 — блочный щит управления;

Элементы компоновки вокруг реактора Рассмотрим основные элементы защиты, внешние по отношению к ВВЭР-1000 в сборе. Корпус реактора устанавливается в *бетонную шахту* (рис 1.2), 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 чугуна 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. [1]

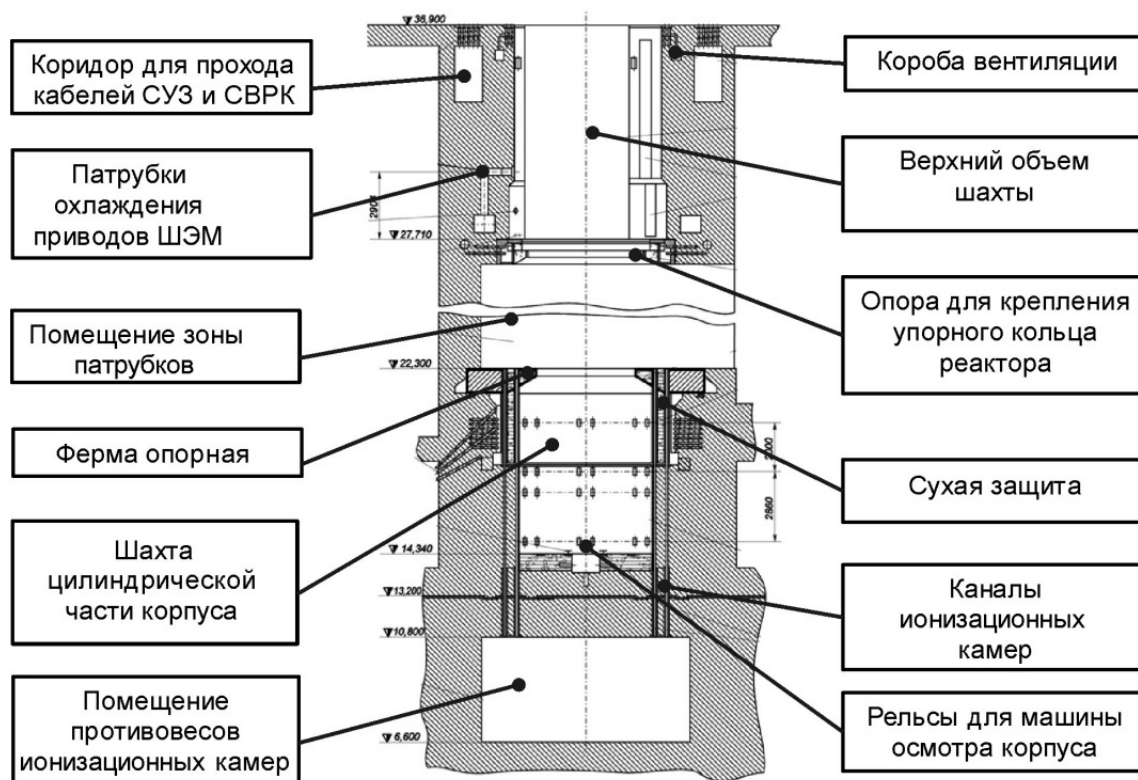


Рисунок 1.2. Бетонная шахта реактора

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.

Корпус и внутрикорпусные элементы компоновки Корпус представляет собой вертикальный герметичный сосуд цилиндрической формы с эллиптическими днищем и крышкой с наружным диаметром 4535 мм, высотой 10.897 м и толщиной 192 мм в цилиндрической части и 210 мм в районе патрубков [1]. В качестве основного материала используется сталь 15Х2НМФА. е. Вся внутренняя поверхность корпуса покрыта антикоррозионной наплавкой из нержавеющей стали толщиной не менее 8 мм. В местах соприкосновения корпуса с крышкой, шахтой, уплотнительными прокладками, в местах приварки кронштейнов, деталей крепления трубок КИП, на поверхности разделительного кольца выполнена наплавка толщиной не менее 15 мм. Внутри реактора также устанавливается шахта, которая представляет собой цилиндрическую обечайку с фланцем и эллиптическим днищем, в котором закреплены 163 опорные трубы (стаканы) с шагом 236 мм, верхние части которых образуют опорную плиту для установки и дистанционирования кассет активной зоны. Материал шахты – сталь 08Х18Н10Т толщиной 55 мм.

Устройство твэла Твэл ядерного реактора ВВЭР-1000 представляет собой трубку, заполненную таблетками из двуокиси урана UO_2 и герметично уплотненную концевыми деталями на сварке. Трубка твэла изготовлена из циркония, легированного 1 % ниобия. Наружный диаметр трубки твэла 9.1 ± 0.05 мм, ее толщина 0.65 ± 0.03 мм, а внутренний диаметр 7.72 ± 0.08 мм. В эту трубку с зазором 0.19–0.32 мм на диаметр помещены таблетки двуокиси урана высотой (длиной) 20 мм и диаметром 7.57 ± 0.04 мм. В середине этих таблеток имеются отверстия диаметром 1.5 мм, а края таблеток скруглены фасками. Общая длина столба этих таблеток в твэле составляет 3530 мм. Все размеры указаны для холодного состояния. Длина трубки твэла составляет 3800 мм, поэтому положение столба топливных таблеток в твэле зафиксировано разрезными втулками из нержавеющей стали и пружиной, не препятствующими тепловым перемещениям. Вид твэла приведён на рис. 1.3 [3]

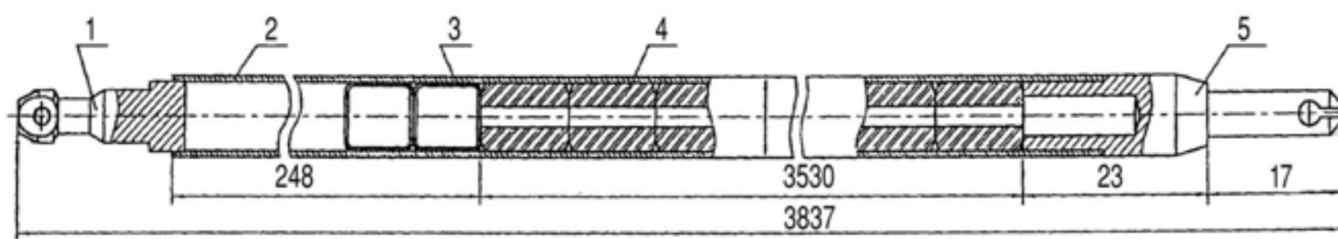


Рисунок 1.3. Тепловыделяющий элемент: 1 – заглушка верхняя; 2 – оболочка; 3 – фиксатор; 4 – таблетка; 5 – заглушка нижняя

Преимущество циркония заключается в удачном сочетании ядерных и физических характеристик с механическими и коррозионными свойствами. Цирконий коррозионно стоек в большинстве сред, применяемых в качестве теплоносителей ядерных реакторов, и достаточно технологичен.

Естественная радиоактивность одной свежей ТВС составляет $1.8 \cdot 10^{10}$ Бк., гамма-излучение на поверхности около 0.2 бэр/ч.

Построение одномерной модели В качестве помещения постоянного пребывания персонала рассматривается блочный щит управления, расположенный в этажерке электроустройств (цифра 12 на рис. ??). Также в этажерке электроустройств размещаются распределительные устройства сетей электропитания двигателей электростанции, аккумуляторные батареи, трансформаторы и т. д. Для построения расчетной модели был определен ряд значимых элементов конструкции реакторной установки с точки зрения нейтронной защиты. От активной зоны рассматриваемое помещение отделено внутрикорпусными элементами, такими как оболочка твэла, внутрикорпусная шахта; корпусом, бетонной внешней шахтой, внешней бетонной оболочкой реактора и бетонной стеной машинного зала. Суммарный слой бетона складывается из 3 м основания гермо-

оболочки, 0.72 м сухой защиты шахты, 1.5 м шахты и 0.5 м стены машинного зала перед этажеркой. Основная доля нейтронного излучения в реакторе приходится на нейтроны теплового спектра. Для таких энергий хорошими поглотителями являются кадмий, графит, бетон. Присутствующее гамма-излучение для своего эффективного поглощения требует свинец и подобные высокоплотные материалы. Таким образом были выбраны слои биологической защиты, представленные в таблице 1.1:

Таблица 1.1: Слои биологической защиты

Название	Материал	Размер, см	Плотность, г/см ³
Внутрикорпусная шахта	сталь 08X18H10T	5.5	7.9
Теплоноситель	H ₂ O	26.3	0.71
Корпус	сталь 15X2НМФА	19.25	7.8
Шахта + гермооболочка + стена	бетон	572	2.35

1.3. Расчет дозы нейтронов из активной зоны реактора

Таблица 1.2: Основные параметры для расчета

Параметр	Значение
Тепловая мощность реактора, МВт $W_{\text{теп}}$	$2.904 \cdot 10^3$
Средняя энергия, выделяющаяся в одной реакции деления, МэВ E_f	200
Средняя энергия нейтронов спектра деления, МэВ E_{nf}	2
Среднее число нейтронов деления на середину кампании, ν_f	2.42
Коэффициент размножения K_{∞}	1.03
Доля нейтронов спектра деления в спектре утечки γ	0.5
Среднее число гамма-квантов деления на середину кампании	7.51
Высота активной зоны $H_{\text{аз}}$, м	3.5
Радиус активной зоны $R_{\text{аз}}$, м	1.58

Число реакций деления в реакторе в единицу времени:

$$N_f = \frac{W_{\text{теп}}}{E_f} \quad (1)$$

$$N_f = \frac{2.90 \cdot 10^9}{2.00 \cdot 10^2 \cdot 1.60 \cdot 10^{-13}} = 9.06 \cdot 10^{19} \frac{\text{дел}}{\text{с}}$$

Число нейтронов, образующихся в реакторе в единицу времени:

$$N_n = N_f \cdot \nu_f \quad (2)$$

$$N_n = 9.06 \cdot 10^{19} \cdot 2.42 = 2.19 \cdot 10^{20}$$

Площадь полной поверхности активной зоны

$$S_{\text{пов}} = S_{\text{бок}} + 2S_{\text{тор}} \quad (3)$$

где

$$\bullet S_{\text{бок}} = H_{\text{аз}} 2\pi R_{\text{аз}}$$

$$\bullet S_{\text{тор}} = \pi R_{\text{аз}}^2$$

$$S_{\text{пов}} = 3.50 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 1.58 + 2 \cdot \pi \cdot (1.58)^2 = 5.04 \cdot 10^1 \text{ м}^2$$

Поток нейтронов утечки из активной зоны:

$$\Phi = \frac{N_n (K_{\infty} - 1)}{S_{\text{пов}}} \quad (4)$$

$$\Phi = \frac{2.19 \cdot 10^{20} (1.03 - 1)}{5.04 \cdot 10^1} = 1.30 \cdot 10^{17} \frac{\text{нейтрон}}{\text{с} \cdot \text{м}^2}$$

Поток нейтронов спектра деления в утечке из активной зоны:

$$\Phi_f = \Phi \cdot \gamma \quad (5)$$

$$\Phi_f = 1.30 \cdot 10^{17} \cdot 5.00 \cdot 10^{-01} = 6.52 \cdot 10^{16} \frac{\text{нейтрон}}{\text{с} \cdot \text{м}^2}$$

Мощность эквивалентной дозы нейтронов перед защитой

$$D_{0n} = \Phi_f \cdot E_{nf} \cdot \overline{\mu_{\text{ЭН}}} \cdot K \quad (6)$$

где

• $\overline{\mu_{\text{ЭН}}} = \frac{1 \text{ м}^2}{100 \text{ кг}}$ — массовый коэффициент поглощения энергии в биологической ткани, принимается равным отношению площади человека к его массе

• $K = 10 \frac{\text{Зв}}{\text{Гр}}$ — коэффициент качества нейтронов спектра деления

$$D_{0n} = 6.52 \cdot 10^{16} \cdot 2.00 \cdot 1.60 \cdot 10^{-13} \cdot 1.00 \cdot 10^{-02} \cdot 1.00 \cdot 10^1 = 2.09 \cdot 10^3 \frac{\text{Зв}}{\text{с}}$$

Результаты расчетов дозы нейтронов из активной зоны представлены в таблице [1.3](#)

Таблица 1.3: Результаты расчета дозы нейтронов

Параметр	Значение
$N_f, \frac{\text{дел}}{\text{с}}$	$9.06 \cdot 10^{19}$
$N_n, \frac{\text{нейтрон}}{\text{с}}$	$2.19 \cdot 10^{20}$
$S_{\text{пов}}, \text{м}^2$	50.4
$\Phi, \frac{\text{нейтрон}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}$	$1.3 \cdot 10^{17}$
$\Phi_f, \frac{\text{нейтрон}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}$	$6.52 \cdot 10^{16}$
$D_{0n}, \frac{\text{ЗВ}}{\text{с}}$	$2.09 \cdot 10^3$

1.4. Расчет дозы нейтронов за защитой или минимального размера слоя биологической защиты для нейтронов

Для расчета дозы нейтронов за защитой используется модель сечения выведения многослойной системы.

Сечение выведение для многослойной системы:

$$D = D_0 \exp \left(- \sum_i \Sigma_{\text{rem}}^i \cdot d_i \right) \quad (7)$$

Для текущей модели раскрывается как:

$$D = D_0 \exp \left(- \Sigma_{\text{rem}}^{\text{H}_2\text{O}} \cdot d_{\text{H}_2\text{O}} - \Sigma_{\text{rem}}^{\text{ст}} \cdot d_{\text{ст}} - \Sigma_{\text{rem}}^{\text{ж/б}} \cdot d_{\text{ж/б}} \right) \quad (8)$$

где $\Sigma_{\text{rem}}^{\text{H}_2\text{O}}$ — сечение выведения слоя воды, $\Sigma_{\text{rem}}^{\text{ст}}$ — сечение выведения слоя стали, $\Sigma_{\text{rem}}^{\text{ж/б}}$ — сечение выведения слоя бетона, $d_{\text{H}_2\text{O}}, d_{\text{ст}}, d_{\text{ж/б}}$ — толщины слоев воды, стали и бетона

Таблица 1.4: Значения сечений выведений защиты и толщины различных слоев [3]

Слой защиты	d, см	$\rho, \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$	$\Sigma_{\text{rem}}, \text{см}^{-1}$
Вода	26.3	0.71	0.069
Сталь	24.75	7.9	0.166
Бетон	572	2.35	0.08

$$D_n = 2.09 \cdot 10^3 \exp(-6.90 \cdot 10^{-02} \cdot 2.63 \cdot 10^1 - 1.66 \cdot 10^{-01} \cdot 2.48 \cdot 10^1 - 8.00 \cdot 10^{-02} \cdot 5.72 \cdot 10^2) = 7.49 \cdot 10^{-20} \frac{\text{Зв}}{\text{с}}$$

Для учета 20% погрешности по дозе модели сечения выведения необходимо использовать поправочный коэффициент 1.2. Итоговая доза с учетом погрешности в Зв / нед:

$$D_{n,\text{нед}} = 1.2 \cdot 7 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60 \cdot 7.490 \cdot 10^{-20} = 5.436 \cdot 10^{-14} \frac{\text{Зв}}{\text{нед}}$$

Перечень использованных источников

1. *Лескин С., Шелегов А., Слободчук В.* Физические особенности и конструкция реактора ВВЭР-1000: [учебное пособие для вузов]. — М. : НИЯУ "МИФИ", 2011. — ISBN 9785726214924.
2. *Монахов А.* Атомные электрические станции и их технологическое оборудование : Учеб. пособие для энерг. и энергостроит. техникумов. — М. : Энергоатомиздат, 1986.
3. *Физика и эксплуатационные режимы реактора ВВЭР-1000 / В. И. Белозеров [и др.].* — М. : НИЯУ МИФИ, 2014. — С. 159, 157, 167, 172.