

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
1.5. Расчет дозы гамма-квантов из активной зоны	10
1.6. Расчет дозы гамма-квантов за защитой или минимального раз- мера слоя биологической защиты для гамма-квантов	13
1.7. Заключение	15
Перечень использованных источников	16

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.

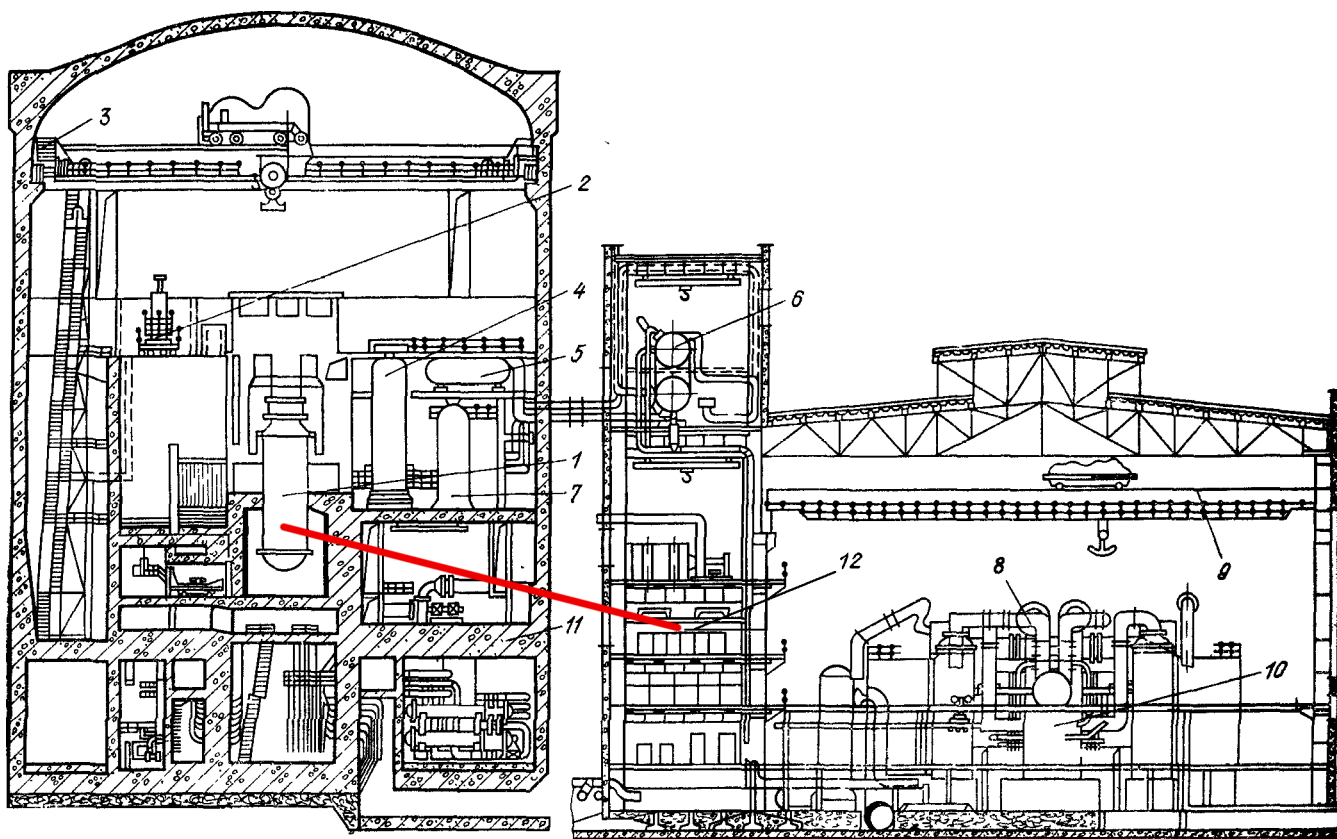


Рисунок 1.1. Общая компоновка энергоблока с РУ ВВЭР-1000 разомкнутой компоновки (Южно-Украинская АЭС) [2]:

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 чугунная 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]

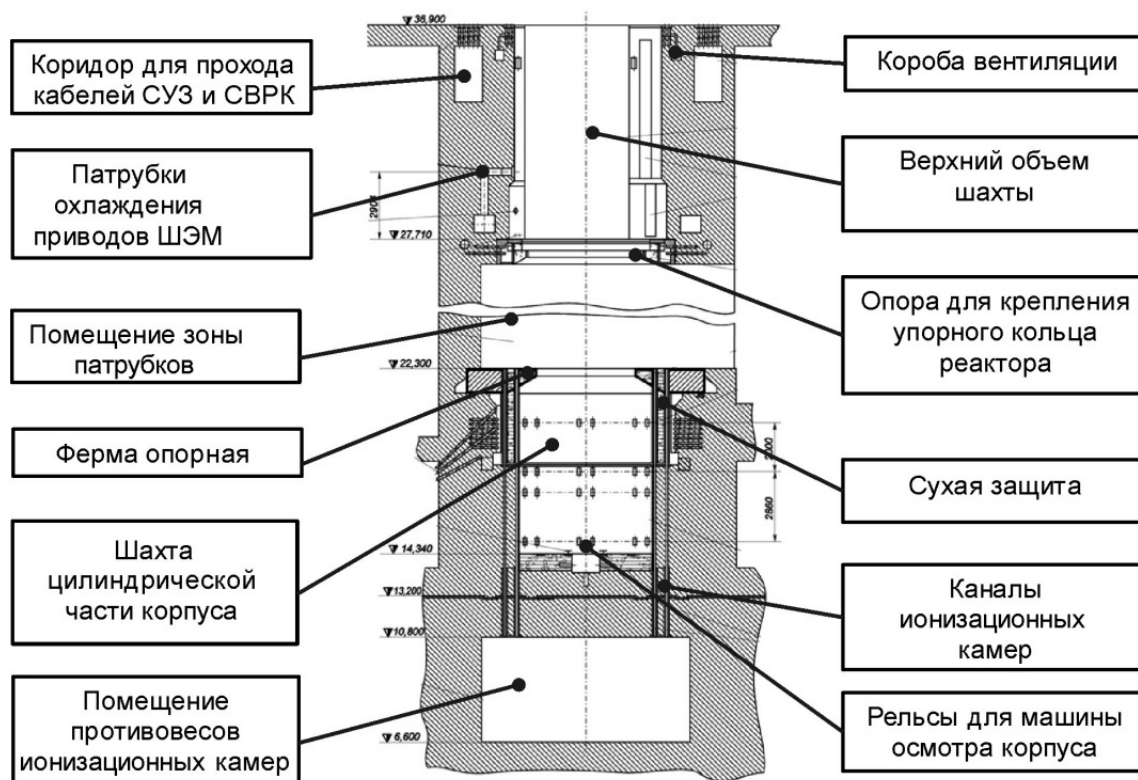


Рисунок 1.2. Бетонная шахта реактора

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 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]

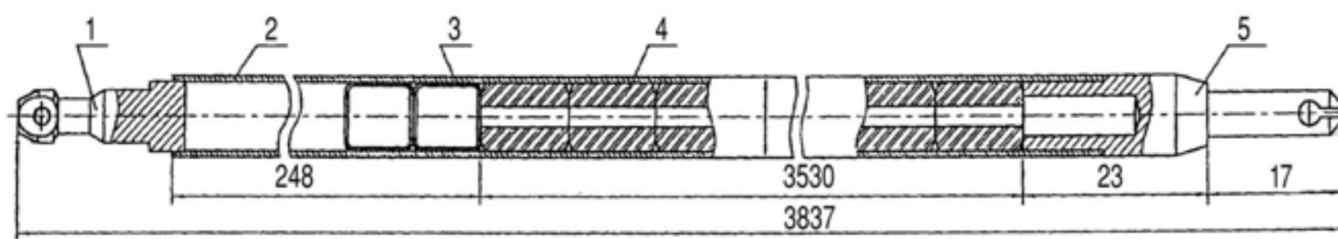


Рисунок 1.3. Тепловыделяющий элемент: 1 – заглушка верхняя; 2 – оболочка; 3 – фиксатор; 4 – таблетка; 5 – заглушка нижняя

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 08Х18Н10Т	5.5	7.9
Теплоноситель	H ₂ O	26.3	0.71
Корпус	сталь 15Х2НМФА	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

$$D_n = 2.09 \cdot 10^3 \exp(-6.90 \cdot 10^{-02} \cdot 2.63 \cdot 10^1 - 1.66 \cdot 10^{-01} \cdot 2.48 \cdot 10^1 - 8.00 \cdot 10^{-02} \cdot 5.7$$

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

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

1.5. Расчет дозы гамма-квантов из активной зоны

Для расчета гамма-квантов перед защитой применен приближенный алгоритм. Его идея – оценить поток гамма-квантов деления из активной зоны реактора в одномерной геометрии и внести поправку на утечку гамма-квантов от других их источников.

Число гамма-квантов, образующихся в реакторе в единицу времени:

$$I = N_f \cdot \nu_\gamma \cdot N_\gamma \quad (9)$$

где N_γ — доля гамма-квантов определенной энергии в реакции деления, для $E=3$ МэВ $N_{\gamma,3\text{МэВ}} = 0.2$, для $E=5$ МэВ $N_{\gamma,5\text{МэВ}} = 0.15$ Тогда число гамма-квантов в единицу времени для двух энергий:

$$I_{3 \text{ МэВ}} = 9.064 \cdot 10^{19} \cdot 2.000 \cdot 10^{-01} \cdot 7.510 = 1.361 \cdot 10^{20} \frac{\text{КВ}}{\text{с}}$$

$$I_{5 \text{ МэВ}} = 9.064 \cdot 10^{19} \cdot 1.500 \cdot 10^{-01} \cdot 7.510 = 1.021 \cdot 10^{20} \frac{\text{КВ}}{\text{с}}$$

Рассмотрим перенос нерассеянных гамма-квантов в однородной пластине с внешним источником, перпендикулярным границам пластины. При этом потребуем выполнения следующих условий:

1. толщина пластины равна L – средней ходе активной зоны $L = \frac{4V_{\text{аз}}}{S_{\text{пов}}}$, где $V_{\text{аз}}$ – объем активной зоны
2. линейный коэффициент ослабления пластины μ_γ вычисляется через коэффициенты ослабления элементарной ячейки реактора

$$\mu_\gamma = \mu_U \varepsilon_U + \mu_{\text{об}} \varepsilon_{\text{об}} + \mu_{\text{т/н}} \varepsilon_{\text{т/н}} + \mu_{\text{зам}} \varepsilon_{\text{зам}} \quad (10)$$

где ε_i – объемные доли топлива, конструкционных материалов, теплоносителя и замедлителя в элементарной ячейке.

Таблица 1.5: Объемные доли материалов

Материал	Объемная доля ε_i
Топливо	0.166
Оболочка (Zr)	0.071
теплоноситель/замедлитель (вода)	0.733

Таблица 1.6: Линейные коэффициенты ослабления μ для гамма-квантов с энергией 3 и 5 МэВ

Материал	$\mu_3, \text{см}^{-1}$	$\mu_5, \text{см}^{-1}$
Топливо	0.81	0.83
Оболочка (Zr)	0.237	0.221
теплоноситель/замедлитель (вода)	0.028	0.021

Таким образом полный линейный коэффициент ослабления для энергий $E=3$ МэВ, 5 МэВ:

$$\begin{aligned}\mu_{\gamma,3 \text{ МэВ}} &= 1.66 \cdot 10^{-1} \cdot 8.10 \cdot 10^{-1} + 7.10 \cdot 10^{-2} \cdot 2.37 \cdot 10^{-1} + 7.33 \cdot 10^{-1} \cdot 2.80 \cdot 10^{-2} \\ &= 1.72 \cdot 10^{-1} \text{ см}^{-1}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\mu_{\gamma,5 \text{ МэВ}} &= 1.66 \cdot 10^{-1} \cdot 8.30 \cdot 10^{-1} + 7.10 \cdot 10^{-2} \cdot 2.21 \cdot 10^{-1} + 7.33 \cdot 10^{-1} \cdot 2.10 \cdot 10^{-2} \\ &= 1.69 \cdot 10^{-1} \text{ см}^{-1}\end{aligned}$$

Объем активной зоны:

$$V_{\text{аз}} = \pi R_{\text{аз}}^2 H_{\text{аз}} = \pi \cdot 1.58^2 \cdot 3.5^2 = 27.45 \text{ м}^3$$

Толщина пластины:

$$L = \frac{4 \cdot 27.45}{5.04 \cdot 10^1} = 2.18 \text{ м} = 217.7 \text{ см}$$

Источник гамма-квантов, равномерно распределенный по объему пластины:

$$Q = \frac{I}{L} \quad (11)$$

$$Q_{3 \text{ МэВ}} = \frac{1.361 \cdot 10^{20}}{2.177 \cdot 10^2} = 6.253 \cdot 10^{17} \frac{\text{КВ}}{\text{с} \cdot \text{см}}$$

$$Q_{5 \text{ МэВ}} = \frac{1.021 \cdot 10^{20}}{2.177 \cdot 10^2} = 4.690 \cdot 10^{17} \frac{\text{КВ}}{\text{с} \cdot \text{см}}$$

Число нерассеянных гамма-квантов через поверхность пластины

$$N = \frac{Q}{\mu_\gamma} (1 - \exp(-\mu_\gamma L)) \quad (12)$$

$$N_{3 \text{ МэВ}} = \frac{6.25 \cdot 10^{17}}{1.72 \cdot 10^{-1}} \cdot (1 - \exp(-1.72 \cdot 10^{-1} \cdot 2.18 \cdot 10^2)) = 3.64 \cdot 10^{18} \frac{\text{КВ}}{\text{с}}$$

$$N_{5 \text{ МэВ}} = \frac{4.69 \cdot 10^{17}}{1.69 \cdot 10^{-1}} \cdot (1 - \exp(-1.69 \cdot 10^{-1} \cdot 2.18 \cdot 10^2)) = 2.78 \cdot 10^{18} \frac{\text{КВ}}{\text{с}}$$

Поток нерассеянных гамма-квантов деления из активной зоны:

$$\Phi_\gamma = \frac{N}{S_{\text{пов}}} \quad (13)$$

$$\Phi_{\gamma,3 \text{ МэВ}} = \frac{3.64 \cdot 10^{18}}{5.04 \cdot 10^5} = 7.22 \cdot 10^{12} \frac{\text{КВ}}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}$$

$$\Phi_{\gamma,5 \text{ МэВ}} = \frac{2.78 \cdot 10^{18}}{5.04 \cdot 10^5} = 5.51 \cdot 10^{12} \frac{\text{КВ}}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}$$

Полный поток гама-квантов из активной зоны с учетом поправочного коэффициента $\xi = 2$:

$$\Phi_\gamma^{\text{full}} = \Phi_\gamma \xi \quad (14)$$

$$\Phi_{\gamma,3 \text{ МэВ}}^{\text{full}} = 7.22 \cdot 10^{12} \cdot 2 = 1.44 \cdot 10^{13} \frac{\text{КВ}}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}$$

$$\Phi_{\gamma,5 \text{ МэВ}}^{\text{full}} = 5.51 \cdot 10^{12} \cdot 2 = 1.10 \cdot 10^{13} \frac{\text{КВ}}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}$$

Мощность эквивалентной дозы гамма-квантов перед защитой

$$D_{0\gamma} = \Phi_\gamma^{\text{full}} \cdot E \cdot \overline{\mu_{\text{ЭН}}} \cdot K \quad (15)$$

$$D_{0\gamma,3 \text{ МэВ}} = 1.44 \cdot 10^{13} \cdot 3 \cdot 1.60 \cdot 10^{-13} \cdot 100 \cdot 1 = 6.94 \cdot 10^2 \frac{\text{ЗВ}}{\text{с}}$$

$$D_{0\gamma,5 \text{ МэВ}} = 1.10 \cdot 10^{13} \cdot 5 \cdot 1.60 \cdot 10^{-13} \cdot 100 \cdot 1 = 8.82 \cdot 10^2 \frac{\text{ЗВ}}{\text{с}}$$

Результат расчета дозы гамма квантов из активной зоны для энергий 3, 5 МэВ представлены в таблицах 1.7, 1.8 соответственно.

Таблица 1.7: Результаты расчета дозы гамма-квантов энергии 3 МэВ

Параметр	Значение
I_3 , кВ	$1.36 \cdot 10^{20}$
L , см	217.7
Q_3 , кВ / (см · с)	$6.25 \cdot 10^{17}$
$\Phi_{\gamma 3}$, $\frac{\text{кВ}}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}$	$7.22 \cdot 10^{12}$
N_3 , кВ / с	$3.64 \cdot 10^{18}$
$D_{0\gamma 3}$, ЗВ / с	694

Таблица 1.8: Результаты расчета дозы гамма-квантов энергии 5 МэВ

Параметр	Значение
I_5 , кВ	$1.02 \cdot 10^{20}$
L , см	217.7
Q_5 , кВ / (см · с)	$4.69 \cdot 10^{17}$
$\Phi_{\gamma 5}$, $\frac{\text{кВ}}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}$	$5.51 \cdot 10^{12}$
N_5 , кВ / с	$2.78 \cdot 10^{18}$
$D_{0\gamma 5}$, ЗВ / с	882

1.6. Расчет дозы гамма-квантов за защитой или минимального размера слоя биологической защиты для гамма-квантов

Для расчета дозы гамма-квантов за защитой или минимального размера слоя биологической защиты для гамма-квантов применена модель дозовых факторов накоплений. Эквивалентная дозы нерассеянных гамма-квантов:

$$D_{\gamma} = D_{0\gamma} \exp \left(- \sum_i \mu_{\gamma i} d_i \right) \quad (16)$$

где $\mu_{\gamma i}$ — линейный коэффициент ослабления i -го слоя, d_i — толщина i -го слоя

Таблица 1.9: Линейные коэффициенты ослабления μ для гамма-квантов с энергией 3 и 5 МэВ за активной зоной

Материал	$\mu_3, \text{см}^{-1}$	$\mu_5, \text{см}^{-1}$
Сталь	0.3	0.25
Бетон	0.08	0.07
Вода	0.028	0.021

$$D_{\gamma, \text{нерас}, 3 \text{ МэВ}} = 6.94 \cdot 10^2 \cdot \exp(-3.00 \cdot 10^{-1} \cdot 2.48 \cdot 10^1 - 8.00 \cdot 10^{-2} \cdot 5.72 \cdot 10^2 - 2.80 \cdot 10^{-2} \cdot 2.63 \cdot 10^1) = 2.65 \cdot 10^{-21} \frac{\text{Зв}}{\text{с}}$$

$$D_{\gamma, \text{нерас}, 5 \text{ МэВ}} = 8.82 \cdot 10^2 \cdot \exp(-2.50 \cdot 10^{-1} \cdot 2.48 \cdot 10^1 - 7.00 \cdot 10^{-2} \cdot 5.72 \cdot 10^2 - 2.10 \cdot 10^{-2} \cdot 2.63 \cdot 10^1) = 4.26 \cdot 10^{-18} \frac{\text{Зв}}{\text{с}}$$

Дозовый фактор, равный отношению эквивалентной дозы гамма-излучения для квантов всех энергий к эквивалентной дозе излучения нерасеянных гамма-квантов от одного источника

$$B_D = \frac{D_{\text{нерас}} - D_{\text{рас}}}{D_{\text{нерас}}} = 1 + \frac{D_{\text{рас}}}{D_{\text{нерас}}} \quad (17)$$

Тогда полная доза гамма-квантов за защитой:

$$D_{\text{полн}} = B_D \cdot D_{\text{нерас}} \quad (18)$$

Для нахождения фактора накопления гомогенной среды можно применить формулу Тейлора:

$$B(\mu d) = A_1 \exp(-\alpha_1 \mu d) + (1 - A_1) \exp(-\alpha_2 \mu d) \quad (19)$$

По формуле Д.Л. Бродлера:

$$B_{\text{гет}} = B_N \left(\sum_i^N \mu_i d_i \right) + \sum_{n=1}^{N-1} \left[B_n \left(\sum_i^n \mu_i d_i \right) - B_{n+1} \left(\sum_i^n \mu_i d_i \right) \right] \quad (20)$$

где $B_j \left(\sum_i^n \mu_i d_i \right)$ — фактор накопления, вычисляемые по формуле Тейлора. Тогда:

$$B_{\text{гет } 3 \text{ МэВ}} = 92.3$$

$$B_{\text{гет } 5 \text{ МэВ}} = 34.7$$

Полная доза гамма-квантов за защитой:

$$D_{\gamma \text{ 3 МэВ}} = 92.3 \cdot 2.65 \cdot 10^{-21} = 2.45 \cdot 10^{-19} \frac{\text{Зв}}{\text{с}}$$
$$D_{\gamma \text{ 5 МэВ}} = 34.7 \cdot 4.26 \cdot 10^{-18} = 1.48 \cdot 10^{-16} \frac{\text{Зв}}{\text{с}}$$

Мощность эквивалентной дозы, создаваемой гамма-квантами всех энергий за защитой в Зв / нед:

$$D_{\gamma} = 7 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60 \cdot (D_{\gamma \text{ 3 МэВ}} + D_{\gamma \text{ 5 МэВ}}) = 8.95 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Зв}}{\text{нед}}$$

Суммарная мощность, создаваемая за защитой нейтронами и гамма-квантами с учетом погрешности метода фактора накопления:

$$D = 1.15(D_n + D_{\gamma}) = 1.15 \cdot (5.44 \cdot 10^{-14} + 8.95 \cdot 10^{-11}) = 1.03 \cdot 10^{-10} \text{ Зв/нед}$$

1.7. Заключение

В работе проводился расчет биологической защиты, была проведена оценка мощностей эквивалентных доз нейтронов и гамма-квантов за защитой.

Оценка проводилась для нейтронных потоков методом сечения выведения для системы со слоями, а также для гамма-квантов с энергиями 3 и 5 МэВ методом дозовых факторов накопления.

По результату работы было получена суммарная мощность эквивалентной дозы нейтронов и гамма-квантов за защитой не превышает $1.03 \cdot 10^{-7} \frac{\text{МЗв}}{\text{нед}}$. Получившаяся доза сильно меньше предельной поглощенной дозы для персонала АЭС, которая составляет $0.4 \frac{\text{МЗв}}{\text{нед}}$, из чего можно сделать вывод, что рассматриваемое помещение БЩУ безопасно с точки зрения радиационной защиты

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.