

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации**  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

Инженерная школа ядерных технологий  
Направление подготовки 14.03.02 Ядерные физика и технологии  
Отделение ядерно-топливного цикла

**Индивидуальное домашнее задание №1  
по дисциплине «Физическая теория ядерных реакторов**

<b>Тема работы</b>
<b>Нейтронно-физический расчет ядерного реактора</b>

Студент

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
0А7В	Гладких М.В.		

Руководитель

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Доцент ОЯТЦ ИЯТШ	Кузнецов М.С.	К.Т.Н.		

Задание на курсовой проект  
для профиля «Ядерные реакторы и энергетические установки»  
«Нейтронно-физический расчет ядерного реактора»  
студенту гр. 0А7В Гладких Михаилу Викторовичу

1. Исходные данные:

- тип реактора: ВВЭР;
- тепловая мощность: 1000 МВт;
- ядерное горючее:  $UO_2$ ;
- обогащение топлива по U-235: 1,8 %;
- теплоноситель: вода;
- температура теплоносителя на входе: 248 °С;
- температура теплоносителя на выходе: 278 °С;
- тип ТВЭлов: стержневые ТВЭлы с наружным охлаждением;
- материал оболочек ТВЭлов и кассет: Zr.

2. Вопросы, подлежащие разработке:

- особенности конструкций различных типов реакторов и выбор основных элементов активной зоны;
- предварительный расчет;
- ядерно-физические характеристики «холодного» реактора;
- оптимизация параметров ячейки и расчет коэффициента размножения;
- расчет эффективного коэффициента размножения.

3. Необходимо представить:

- расчетно-пояснительную записку, включающую предварительный тепловой расчет, физический расчет;
- графический материал: схема ячейки;
- презентацию проведённых расчетов.

## Содержание

Введение.....	4
1 Реакторные установки типа ВВЭР .....	5
1.1 Ядерный реактор типа ВВЭР-1000 .....	5
2 Нейтронно-физический расчёт реактора .....	9
2.1 Предварительный расчет .....	9
2.2 Расчет концентраций.....	12
2.3 Гомогенизация .....	13
2.3.1 Гомогенизация первого вида .....	14
2.3.2 Гомогенизация второго вида.....	15
2.4 Расчет микроскопических и макроскопических сечений.....	17
2.4.1 Расчет микроскопических и макроскопических сечений для $U^{235}$	19
2.5 Расчет коэффициента размножения для бесконечной среды .....	20
2.5.1 Расчет коэффициента выхода нейтронов на одно поглощение .....	20
2.5.2 Расчет коэффициента размножения на быстрых нейтронах .....	21
2.5.3 Расчет коэффициента использования тепловых нейтронов .....	22
2.5.4 Расчет вероятности избежать резонансного захвата .....	24
2.6 Оптимизация параметров ячейки.....	25
2.7 Расчет эффективного коэффициента размножения ЯР .....	27
Заключение .....	29
Список литературы .....	30
Приложение А .....	31
Приложение Б .....	32

## **Введение**

На данный момент ядерная энергетика является одной из самых перспективных крупных отраслей, которая вырабатывает электроэнергию. В перспективном будущем планируется увеличение количества атомных электростанций (АЭС) не только в России, но и во всем мире.

Предприятия, в основе которых лежит выработка электроэнергии, с использованием углеводородного топлива и других продуктов горения оказывает большой вред окружающей среде. Данный глобальный недостаток отсутствует у АЭС, при условии нормальной и безопасной эксплуатации. И уже сейчас можно сказать, что доля электроэнергии, которую вырабатывают АЭС, растет с каждым годом. На данный момент тридцать одна страна мира получает энергию с помощью 438 энергоблоков. В России 33 действующих энергоблока, двадцать один из них — это энергоблоки эксплуатирующие реакторные установки типа ВВЭР.

Нейтронно-физический расчет реактора является неотъемлемой частью при проектировании и строительстве ядерных реакторов. В данной работе проведен нейтронно-физического расчёта реактора типа ВВЭР, включающий предварительный расчет, расчет ядерно-физических характеристик «холодного» реактора и расчет коэффициента размножения. Также представлены сведения о реакторных установках типа ВВЭР.

## **Реакторные установки типа ВВЭР**

В современной энергетике роль атомных станций играет значительную роль в производстве электроэнергии. В России из числа всех предприятий, которые производят электроэнергию, доля атомных станций составляет 16 %. В нашей стране работают 10 атомных электростанций, которые состоят из 35 энергоблоков. Из них 19 энергоблоков имеют реактор типа ВВЭР. Этот вид реактора корпусного типа; в качестве теплоносителя и замедлителя используется вода с борной кислотой, которая уменьшается в процессе эксплуатации.

### **1.1 Ядерный реактор типа ВВЭР-1000**

Реактор ВВЭР-1000 (рисунок 1.1) является составной частью энергоблока АЭС и совместно с турбогенератором используется для производства электроэнергии в базовом режиме. Назначение реакторной установки – выработка сухого насыщенного пара для турбогенераторной установки, где тепловая энергия пара преобразуется в электрическую энергию.

Реактор ВВЭР-1000 является реактором корпусного типа с водой под давлением. Реактор энергетический ВВЭР-1000 предназначен для выработки тепловой энергии за счет цепной реакции деления атомных ядер. Реактор водородной, гетерогенный, корпусного типа, работающий на тепловых нейтронах с водо-водяным теплоносителем-замедлителем.

Реактор представляет собой вертикальный цилиндрический корпус с эллиптическим днищем, внутри которого размещается активная зона и внутрикорпусные устройства. Сверху реактора герметично закрыт крышкой с установленными на ней приводами механизмов и органов регулирования и защиты реактора и патрубки для вывода кабелей датчиков внутриреакторного контроля. Крепление крышки к корпусу осуществляется шпильками.

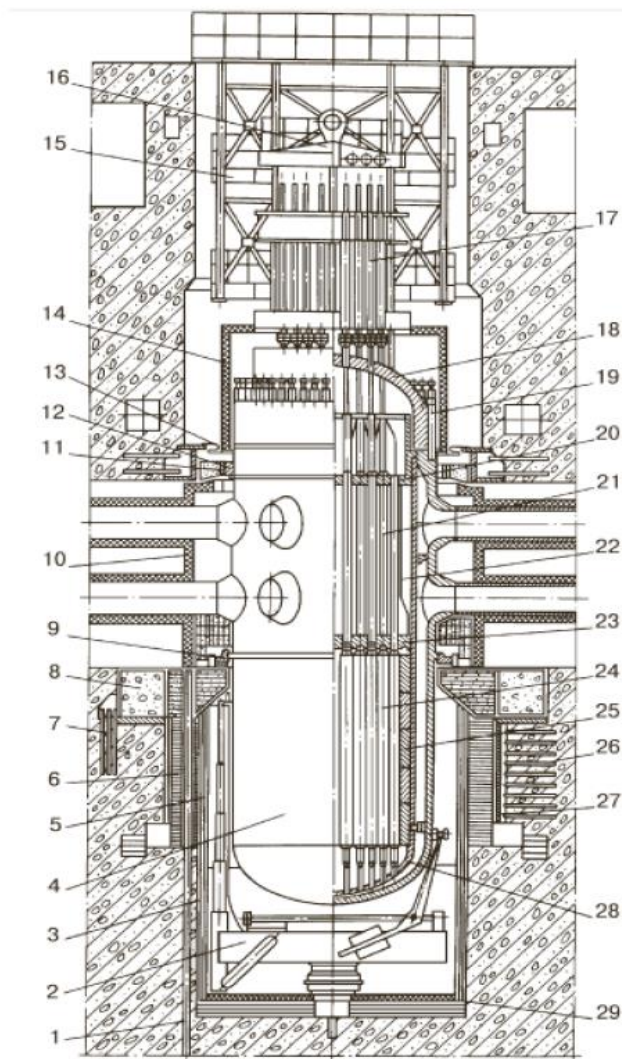


Рисунок 1.1 – Общий вид реактора ВВЭР-1000: 1 – канал ионизационной камеры; 2 – машина осмотра корпуса; 3 – нижняя секция теплоизоляции; 4 – корпус реактора; 5 – верхняя секция теплоизоляции; 6 – металлоконструкция радиационно-тепловой защиты; 7 – анкерные связи опорной фермы; 8 – опорная ферма; 9 – опорное кольцо корпуса; 10 – теплоизоляция зоны патрубков; 11 – шпонка упорного кольца; 12 – упорное кольцо; 13 – сильфон; 14 – теплоизоляция ВБ; 15 – каркас; 16 – траверса; 17 – приводы СУЗ; 18 – крышка ВБ; 19 – шпилька ГРР; 20 – верхняя плита БЗТ; 21 – защитная труба БЗТ; 22 – БЗТ; 23 – нижняя плита БЗТ; 24 – ТВС; 25 – выгородка; 26 – анкерная связь обечайки бокса; 27 – обечайка бокса; 28 – шахта реактора с днищем; 29 – теплоизоляция нижней части

В верхней части корпуса имеются патрубки для подвода и отвода теплоносителя, расположенные в два ряда, а также патрубки для аварийного подвода теплоносителя при разгерметизации первого контура.

Нагрев воды осуществляется в активной зоне за счет тепловыделение топливных элементов. Твэлы заполнены слабообогащенным диоксидом урана-235. В настоящее время на всех АЭС с ВВЭР-1000 реализован трехлетний топливный цикл, т.е. каждая ТВС используется в реакторе в течение трех кампаний.

Регулирование реактивности и, тем самым, тепловыделения, осуществляется перемещением органов регулирования с твердым поглотителем, а также изменением концентрации борной кислоты в теплоносителе.

Реактор устанавливается в бетонной шахте, обеспечивающей надежное крепление реактора и биологическую защиту. Конструкция реактора и способ его закрепления, а также системы управления и защиты (СУЗ) и аварийного охлаждения зоны (СОАЗ) обеспечивают безопасную остановку и расхолаживание, в том числе при максимальном расчетном землетрясении 9 баллов по шкале MSK-64, а также обеспечивают прочность конструкции при одновременном воздействии нагрузок, вызванных максимальным расчетным землетрясением и разрывом трубопровода Ду 850 по полному сечению.

В соответствии с принятой классификацией по безопасности реактор относится к устройствам нормальной эксплуатации и обеспечивает осуществление технологических процессов в нормальных условиях эксплуатации (разогрев, выход на мощность, работа на мощности, остановка, расхолаживание и перегрузка топлива). Срок службы оборудования реактора 30 лет. Расчетный срок службы корпуса и крышки реактора 40 лет.

ВВЭР обладает следующими достоинствами:

– удачное использование воды в качестве теплоносителя и замедлителя;

- доступность, а, следовательно, дешевизна воды, а также отработаны технологии по ее получению;
- наличие высокой замедляющей способности, а, следовательно, высокое энерговыделение с единицы объема;
- большие удельная и объемная мощности при относительно небольших габаритах и умеренных критических нагрузках реактора;
- вода как теплоноситель эффективно отводит тепло.

Недостатки реактора типа ВВЭР, обусловленные в основном водой:

- относительно высокое поглощение нейтронов водой, а поэтому должно использоваться только обогащенное топливо;
- возможность неравномерного распределения энерговыделения, из-за сильного замедления нейтронов в воде;
- коррозионная активность воды с конструкционными материалами, что приводит к использованию двуокиси урана и нержавеющей стали, это ухудшает баланс нейтронов увеличивает затраты на эксплуатацию;
- высокое давление при энергетически приемлемых температурах;
- тепловой поток ограничен критическими тепловыми нагрузками.



# Нейтронно-физический расчёт реактора

## 1.2 Предварительный расчет

Для расчета нейтронно-физических параметров реактора на тепловых нейтронах требуется определить размеры активной зоны данного реактора для обеспечения нужного теплосъема при заданной мощности аппарата. Все необходимые величины для расчета указаны в таблице 1.

Таблица 1 – Рабочие параметры реактора

Параметр	Обозначение	Значение
Тепловая мощность, МВт	$N$	1000
Средняя удельная объемная нагрузка, кВт/л	$N_0$	110
Отношение высоты к диаметру	$m$	1,1
Коэффициент увеличения объема АЗ за счёт СУЗ	$\eta$	1,1
Объемный коэффициент неравномерности	$K_v$	2
Осевой коэффициент неравномерности	$K_z$	1,47
Размер элементарной ячейки под ключ, см	$h_{яч}$	1,275
Внешний диаметр ТВЭЛ, см	$D_{ТВЭЛ}$	0,91

Исходя из требуемой мощности реактора, размеры активной зоны можно оценить следующим образом:

$$V_{аз} = \frac{N}{N_0} \cdot \eta, [M^3]; \quad (1)$$

$$D_{аз} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot V_{аз}}{\pi \cdot m}}, [M]; \quad (2)$$

$$H_{аз} = D_{аз} \cdot m, [M]; \quad (3)$$

Где  $V_{аз}$ ,  $D_{аз}$ ,  $H_{аз}$  – объем, диаметр и высота активной зоны;

$m$  – отношение высоты к диаметру;

$N$  – заданная тепловая мощность реактора, МВт;

$\eta$  – коэффициент, учитывающий увеличение объема реактора.

Вследствие размещения регулирующих стержней СУЗ максимальная удельная объемная нагрузка активной зоны:

$$N_{0max} = \bar{N}_0 \cdot K_v, \left[ \frac{\text{кВт}}{\text{л}} \right]; \quad (4)$$

где  $K_v$  – объемный коэффициент неравномерности плотности потока нейтронов;

$\bar{N}_0$  – средняя удельная объемная нагрузка, кВт/л.

Максимально допустимая тепловая нагрузка:

$$q_{max} = \frac{N_{0max} \cdot S_{яч}}{116 \cdot \Pi_0}, \left[ \frac{\text{Гкал}}{\text{м}^2 \cdot \text{ч}} \right]; \quad (5)$$

где  $\Pi_0$  – периметр тепловыделяющей поверхности одного ТВЭЛа, см;

$S_{яч}$  – площадь сечения элементарной ячейки, см<sup>2</sup>.

Необходимая для отвода тепла скорость определяется в максимально напряженно тепловыделяющем элементе из следующего выражения:

$$v = \frac{q_{max} \cdot \Pi_0 \cdot H_{аз}}{3,6 \cdot K_z \cdot \rho \cdot \Delta i \cdot S_{тн}}, \left[ \frac{\text{м}}{\text{с}} \right]; \quad (6)$$

где  $v$  – скорость прокачки теплоносителя;

$K_z$  – осевой коэффициент неравномерности плотности потока нейтронов;

$S_{тн}$  – площадь сечения прохода теплоносителя, приходящаяся на один ТВЭЛ, см<sup>2</sup>;

$\rho$  – плотность теплоносителя при рабочих параметрах, г/см<sup>3</sup>;

$\Delta i$  – разность теплосодержания теплоносителя на входе и выходе, ккал/кг.

Данная величина находится по следующей формуле:

$$\Delta i = C_p (t_{вых} - t_{вх}), \left[ \frac{\text{ккал}}{\text{кг}} \right]; \quad (7)$$

где  $C_p$  – теплоемкость теплоносителя при постоянном давлении, ккал/(кг·градус);

$t_{вых}$ ,  $t_{вх}$  – температура теплоносителя на входе и выходе, °С.

Объем активной зоны:

$$V_{аз} = \frac{N}{N_0} \cdot \eta = \frac{1000}{110} \cdot 1,1 = 10 \text{ м}^3.$$

Диаметр активной зоны:

$$D_{аз} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot V_{аз}}{\pi \cdot m}} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 10}{\pi \cdot 1,1}} = 2,26 \text{ м.}$$

Высота активной зоны:

$$H_{аз} = D_{аз} \cdot m = 2,26 \cdot 1,1 = 2,49 \text{ м.}$$

Максимальная удельная объемная нагрузка активной зоны:

$$N_{0max} = \bar{N}_0 \cdot K_v = 110 \cdot 2 = 220 \frac{\text{кВт}}{\text{л}}.$$

Площадь сечения элементарной ячейки:

$$S_{яч} = 2 \cdot \sqrt{3} \cdot \left(\frac{h_{яч}}{2}\right)^2 = 2 \cdot \sqrt{3} \cdot \left(\frac{1,275}{2}\right)^2 = 1,408 \text{ см}^2.$$

Периметр тепловыделяющей поверхности твэла:

$$\Pi_0 = \pi \cdot D_{ТВЭЛ} = \pi \cdot 0,91 = 2,857 \text{ см.}$$

Максимально допустимая тепловая нагрузка:

$$q_{max} = \frac{N_{0max} \cdot S_{яч}}{116 \cdot \Pi_0} = \frac{220 \cdot 1,408}{116 \cdot 2,857} = 0,934 \frac{\text{Гкал}}{\text{м}^2 \cdot \text{ч}}.$$

Площадь сечения твэла:

$$S_{ТВЭЛ} = \pi \cdot \frac{D_{ТВЭЛ}^2}{4} = \pi \cdot \frac{0,91^2}{4} = 0,65 \text{ см}^2.$$

При параметрах теплоносителя  $t = 263 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $P = 16 \text{ МПа}$ ,  $\rho = 0,779 \text{ г/см}^3$  и  $C_p = 1,19 \text{ ккал/кг}\cdot\text{град}$ :

$$\Delta i = C_p (t_{\text{вых}} - t_{\text{вх}}) = 1,19(278 - 248) = 35,7 \frac{\text{ккал}}{\text{кг}}.$$

Площадь сечения прохода теплоносителя, приходящаяся на 1 твэл:

$$S_{\text{ТН}} = S_{\text{яч}} - S_{\text{ТВЭЛ}} = 1,408 - 0,65 = 0,758 \text{ см}^2;$$

$$v = \frac{0,934 \cdot 2,857 \cdot 249}{3,6 \cdot 1,47 \cdot 0,779 \cdot 35,7 \cdot 0,758} = 5,96 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Таким образом, получившаяся скорость прокачки теплоносителя удовлетворяет установленным требованиям ( $v < 10 \text{ м/с}$ )

### 1.3 Расчет концентраций

Поскольку ячейка реактора состоит из нескольких зон с различными ядерными свойствами, необходимо рассчитать нейтронно-физические характеристики (сечения взаимодействия, коэффициенты диффузии, замедляющие свойства) для каждой зоны; оболочка – Zn, теплоноситель и замедлитель – легкая вода  $H_2O$ . Вычисление ядерных концентраций производят для каждого элемента активной зоны и отражателя. Ядерная концентрация находится по формуле:

$$N = \frac{N_a \cdot \rho}{A}, \left[ \frac{\text{ядер}}{\text{см}^3} \right]; \quad (8)$$

где  $\rho$  – плотность вещества,  $г/см^3$ ;

$N_a$  – число Авогадро, моль<sup>-1</sup>;

$A$  – атомный вес элемента, г/моль.

Топливом является двуокись урана ( $UO_2$ ), обогащенная по  $U^{235}$  на 1,8 %, поэтому ядерная концентрация топлива рассчитывается следующим образом:

$$N_{UO_2} = \frac{N_a \cdot \rho_{UO_2}}{A_{UO_2}} = \frac{6,023 \cdot 10^{23} \cdot 10,2}{270} = 2,275 \cdot 10^{22} \frac{\text{молекул}}{\text{см}^3}.$$

Расчет концентрации отдельных элементов, входящих в состав топлива, осуществляется следующим образом:

$$N_{U^{235}} = C_{U^{235}} \cdot N_{UO_2} = 0,018 \cdot 2,275 \cdot 10^{22} = 4,096 \cdot 10^{20} \frac{\text{ядер}}{\text{см}^3};$$

$$N_{U^{238}} = (1 - C_{U^{235}}) \cdot N_{UO_2} = (1 - 0,018) \cdot 2,275 \cdot 10^{22} = 2,23 \cdot 10^{22} \frac{\text{ядер}}{\text{см}^3};$$

$$N_O(\text{топ}) = 2 \cdot N_{UO_2} = 2 \cdot 2,275 \cdot 10^{22} = 4,551 \cdot 10^{22} \frac{\text{ядер}}{\text{см}^3}.$$

Теплоносителем в данном ядерном реакторе служит вода:

$$N_{H_2O} = \frac{N_a \cdot \rho_{H_2O}}{A_{H_2O}} = \frac{6,023 \cdot 10^{23} \cdot 1}{18} = 3,346 \cdot 10^{22} \frac{\text{молекул}}{\text{см}^3};$$

$$N_H = 2 \cdot N_{H_2O} = 2 \cdot 3,346 \cdot 10^{22} = 6,692 \cdot 10^{22} \frac{\text{ядер}}{\text{см}^3};$$

$$N_O(\text{тн}) = N_{H_2O} = 3,346 \cdot 10^{22} \frac{\text{ядер}}{\text{см}^3}.$$

В качестве оболочки твэла используется цирконий. Соответственно, рассчитаем его концентрацию:

$$N_{Zn} = \frac{N_a \cdot \rho_{Zn}}{A_{Zn}} = \frac{6,023 \cdot 10^{23} \cdot 6,45}{91} = 4,269 \cdot 10^{22} \frac{\text{ядер}}{\text{см}^3}.$$

При изготовлении в твэлы закачивается гелий, тогда его концентрация будет равна:

$$N_{Zn} = \frac{N_a \cdot \rho_{Zn}}{A_{Zn}} = \frac{6,023 \cdot 10^{23} \cdot 0,00017846}{91} = 2,687 \cdot 10^{19} \frac{\text{ядер}}{\text{см}^3}.$$

#### 1.4 Гомогенизация

Гетерогенная элементарная ячейка данного реактора изображена на рисунке 2, где горизонтальной штриховкой обозначен замедлитель-теплоноситель ( $H_2O$ ), заштрихованная окружность большего диаметра – оболочка твэла, центральным отверстием – гелий, заштрихованная окружность меньшего диаметра – топливо ( $UO_2$ ). На данном рисунке представлена упрощенная схема элементарной ячейки.

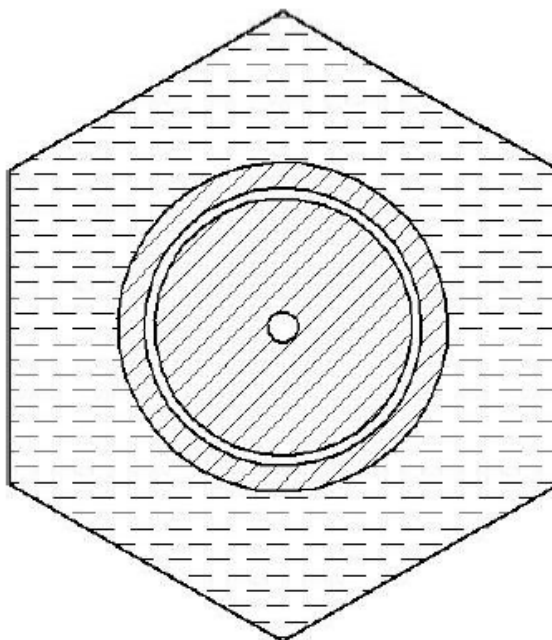


Рисунок 2 – Гетерогенная элементарная ячейка

Для упрощения расчета необходимо провести гомогенизацию данной ячейки двумя способами.

Для проведения гомогенизации были приняты следующие геометрические величины:

Внешний радиус твэла (оболочки)	$R_{\text{ТВЭЛ}} = 0,455 \text{ см.}$
Внутренний радиус твэла (топлива)	$r_{\text{ТВЭЛ}} = 0,07 \text{ см.}$
Внутренний радиус оболочки	$r_{\text{об}} = 0,39 \text{ см.}$
Внешний радиус топлива	$R_{\text{ТОП}} = 0,3765 \text{ см.}$
Площадь сечения твэла	$S_{\text{ТВЭЛ}} = 0,65 \text{ см}^2.$
Площадь сечения замедлителя-теплоносителя	$S_{\text{ТН}} = 0,758 \text{ см}^2.$
Площадь сечения ячейки	$S_{\text{яч}} = 1,407 \text{ см}^2.$

#### 1.4.1 Гомогенизация первого вида

В данном случае необходимо представить элементарную ячейку в виде однородной гомогенизированной смеси. Эскиз данной ячейки изображен на рисунке 3, где обозначена гомогенизированная смесь элементов, входящих в ячейку.

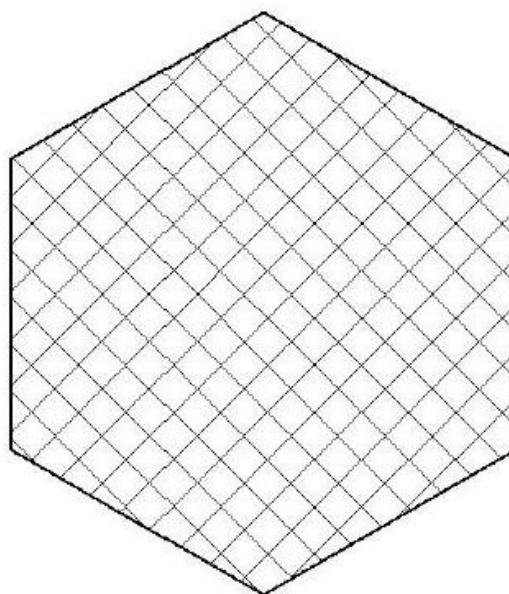


Рисунок 3 – Элементарная ячейка после гомогенизации первого вида

Ядерные концентрации гомогенизированных элементов находятся по следующей формуле:

$$N_i^{\Gamma 1} = \frac{N_i \cdot S_i}{S_{\text{яч}}}, \left[ \frac{\text{ядер}}{\text{см}^3} \right]; \quad (9)$$

где  $N_i$  – гетерогенная ядерная концентрация  $i$ -го элемента, ядер/см<sup>3</sup>;

$S_i$  – площадь сечения  $i$ -го элемента в элементарной ячейке, см<sup>2</sup>.

Рассчитаем площади сечения недостающих элементов:

$$S_{\text{топ}} = \pi \cdot (R_{\text{топ}}^2 - r_{\text{ТВЭЛ}}^2) = \pi \cdot (0,3675^2 - 0,07^2) = 0,43 \text{ см}^2;$$

$$S_{\text{об}} = \pi \cdot (R_{\text{ТВЭЛ}}^2 - r_{\text{об}}^2) = \pi \cdot (0,455^2 - 0,39^2) = 0,17 \text{ см}^2;$$

$$S_{\text{He}} = \pi \cdot (r_{\text{об}}^2 - R_{\text{топ}}^2) - \pi \cdot r_{\text{ТВЭЛ}}^2 = \pi \cdot (0,3675^2 - 0,07^2) + \pi \cdot 0,07^2 = 0,048 \text{ см}^2.$$

Соответственно, ядерные концентрации после гомогенизации будут равны:

$$N_{U^{235}}^{\Gamma 1} = \frac{N_{U^{235}} \cdot S_{\text{топ}}}{S_{\text{яч}}} = \frac{4,096 \cdot 10^{20} \cdot 0,43}{1,407} = 1,25 \cdot 10^{20} \frac{\text{ядер}}{\text{см}^3};$$

$$N_{U^{238}}^{\Gamma 1} = \frac{N_{U^{238}} \cdot S_{\text{топ}}}{S_{\text{яч}}} = \frac{2,23 \cdot 10^{22} \cdot 0,43}{1,407} = 6,82 \cdot 10^{21} \frac{\text{ядер}}{\text{см}^3};$$

$$N_O^{\Gamma 1}(\text{топ}) = \frac{N_O(\text{топ}) \cdot S_{\text{топ}}}{S_{\text{яч}}} = \frac{4,55 \cdot 10^{22} \cdot 0,43}{1,407} = 1,39 \cdot 10^{22} \frac{\text{ядер}}{\text{см}^3};$$

$$N_H^{\Gamma 1} = \frac{N_H \cdot S_{\text{тн}}}{S_{\text{яч}}} = \frac{6,69 \cdot 10^{22} \cdot 0,758}{1,407} = 3,6 \cdot 10^{22} \frac{\text{ядер}}{\text{см}^3};$$

$$N_O^{\Gamma 1}(\text{тн}) = \frac{N_O(\text{тн}) \cdot S_{\text{тн}}}{S_{\text{яч}}} = \frac{3,35 \cdot 10^{22} \cdot 0,758}{1,407} = 1,8 \cdot 10^{22} \frac{\text{ядер}}{\text{см}^3};$$

$$N_{Zn}^{\Gamma 1} = \frac{N_{Zn} \cdot S_{\text{об}}}{S_{\text{яч}}} = \frac{4,27 \cdot 10^{22} \cdot 0,173}{1,407} = 5,23 \cdot 10^{21} \frac{\text{ядер}}{\text{см}^3};$$

$$N_{He}^{\Gamma 1} = \frac{N_O \cdot S_{\text{He}}}{S_{\text{яч}}} = \frac{2,68 \cdot 10^{19} \cdot 0,048}{1,407} = 9,14 \cdot 10^{17} \frac{\text{ядер}}{\text{см}^3}.$$

#### 1.4.2 Гомогенизация второго вида

В данном случае необходимо разделить гетерогенную элементарную ячейку на две гомогенизированные зоны: замедлитель-теплоноситель и

фиктивный блок. Эскиз данной ячейки изображен на рисунке 4, где горизонтальной штриховкой обозначен замедлитель-теплоноситель (H<sub>2</sub>O), окружностью меньшего диаметра отмечена гомогенизированная смесь элементов ТВЭЛА.

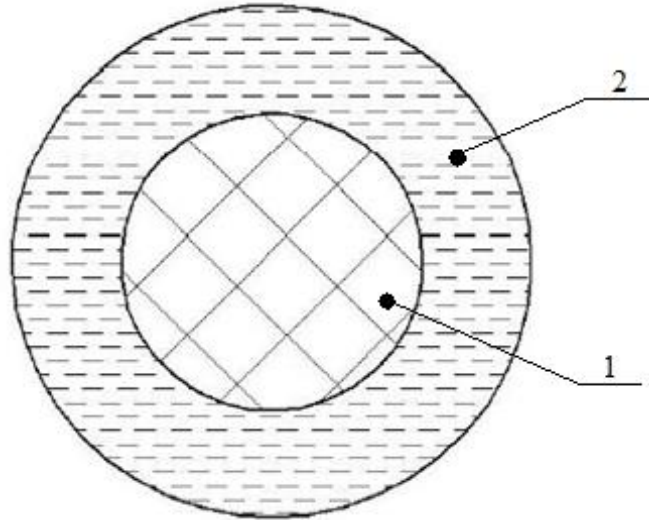


Рисунок 4 – Элементарная ячейка после гомогенизации второго вида (1 – фиктивный блок; 2 – замедлитель-теплоноситель)

Ядерные концентрации элементов замедлителя-теплоносителя остаются неизменными, по сравнению, с гетерогенной ячейкой, так как:

$$N_i^{\Gamma 2} = \frac{N_i \cdot S_{\text{ТН}}}{S_{\text{ТН}}} = N_i, \left[ \frac{\text{ядер}}{\text{см}^3} \right]; \quad (10)$$

$$N_H^{\Gamma 2} = N_H = 6,692 \cdot 10^{22} \frac{\text{ядер}}{\text{см}^3}; \quad (11)$$

$$N_O^{\Gamma 2}(\text{ТН}) = N_O(\text{ТН}) = 3,346 \cdot 10^{22} \frac{\text{ядер}}{\text{см}^3}; \quad (12)$$

Ядерные концентрации элементов ТВЭЛА рассчитываются по следующей формуле:

$$N_i^{\Gamma 2} = \frac{N_i \cdot S_i}{S_{\text{ТВЭЛ}}}, \left[ \frac{\text{ядер}}{\text{см}^3} \right]; \quad (13)$$

Тогда:

$$N_{U^{235}}^{\Gamma 2} = \frac{N_{U^{235}} \cdot S_{\text{ТОП}}}{S_{\text{ТВЭЛ}}} = \frac{4,096 \cdot 10^{20} \cdot 0,43}{0,65} = 2,71 \cdot 10^{20} \frac{\text{ядер}}{\text{см}^3};$$



$$N_{U^{238}}^{\Gamma 2} = \frac{N_{U^{235}} \cdot S_{\text{ТОП}}}{S_{\text{ТВЭЛ}}} = \frac{2,23 \cdot 10^{22} \cdot 0,43}{0,65} = 1,48 \cdot 10^{22} \frac{\text{ядер}}{\text{см}^3};$$

$$N_O^{\Gamma 2}(\text{ТОП}) = \frac{N_O(\text{ТОП}) \cdot S_{\text{ТОП}}}{S_{\text{ТВЭЛ}}} = \frac{4,55 \cdot 10^{22} \cdot 0,43}{0,65} = 3,01 \cdot 10^{22} \frac{\text{ядер}}{\text{см}^3};$$

$$N_{Zn}^{\Gamma 2} = \frac{N_{Zn} \cdot S_{\text{ТОП}}}{S_{\text{ТВЭЛ}}} = \frac{4,27 \cdot 10^{22} \cdot 0,173}{0,65} = 1,13 \cdot 10^{22} \frac{\text{ядер}}{\text{см}^3};$$

$$N_{He}^{\Gamma 2} = \frac{N_{He} \cdot S_{He}}{S_{\text{ТВЭЛ}}} = \frac{2,68 \cdot 10^{19} \cdot 0,048}{0,65} = 1,98 \cdot 10^{18} \frac{\text{ядер}}{\text{см}^3}.$$

## 1.5 Расчет микроскопических и макроскопических сечений

Так как приведенные в справочниках значения сечений указаны для энергии нейтронов, равной 0,0252 эВ, при которой распределение нейтронов соответствует спектру Максвелла, возникла необходимость их обработки.

При нейтронно-физических расчетах все поперечные сечения должны быть отнесены к средней скорости нейтронов. Спектр Максвелла для тепловых нейтронов постепенно переходит в спектр замедляющихся нейтронов при температуре 293 К и при энергии примерно равной  $E = 0,2$  эВ, которая называется «энергией сшивки».

В реальных средах распределение тепловых нейтронов не совпадает в точности с распределением Максвелла, поскольку имеет место поглощение тепловых нейтронов (спектр сдвинут в область больших энергий).

Для удобства расчетов в теории реакторов принято, что тепловые нейтроны распределены по спектру Максвелла, но имеют более высокую эффективную температуру (температура нейтронного газа –  $T_{\text{н.г.}}$ ), которая превышает температуру замедлителя.

Поперечные сечения поглощения и деления, отнесенные к средней скорости тепловых нейтронов, определяются по формуле:

$$\sigma_a = \sigma_{a0} \cdot 0,884 \cdot f_a \cdot \sqrt{\frac{293}{T_{\text{н.г.}}}}, \text{ [барн];} \quad (14)$$

$$\sigma_f = \sigma_{f0} \cdot 0,884 \cdot f_f \cdot \sqrt{\frac{293}{T_{н.г.}}}, [\text{барн}]. \quad (15)$$

где  $\sigma_{f0}, \sigma_{a0}$  – табличные значения сечений;

$f_f, f_a$  – поправочные коэффициенты, учитывающие отклонение сечения поглощения и деления от закона  $1/v$ .

В тепловых реакторах температура нейтронного газа превышает температуру среды на 50-100 градусов. Принимаем  $T_{н.г.} = 393 \text{ К}$ .

Микроскопические сечения рассеяния практически не зависят от энергии тепловых нейтронов, поэтому непосредственно можно воспользоваться для них табличными данными. Макроскопические поперечные сечения вычисляются следующим образом:

$$\Sigma_i = \sigma_i \cdot N_i, [\text{см}^{-1}]; \quad (16)$$

причем:

$$\sigma_i^{tr} = \sigma_i^a + \sigma_i^{in} + \sigma_i^e \cdot (1 - \mu_i^e). \quad (17)$$

Замедляющую способность вещества можно оценить по соотношению:

$$\xi \Sigma_{s_i} = \sum_{i=1}^m \xi_i \cdot \Sigma_{s_i} \quad (18)$$

где  $\xi_i$  – логарифмический декремент,

$$\xi_i = 1 + \frac{(A_i - 1)^2}{2 \cdot A_i} \cdot \ln \left( \frac{A_i - 1}{A_i + 1} \right). \quad (19)$$

Для гомогенных смесей и гетерогенных сред, рассматриваемых как гомогенные, все макроскопические сечения вычисляются по общему правилу:

$$\Sigma_i = \sum_{i=1}^m N_i^r \cdot \sigma_i. \quad (20)$$

Для смеси веществ логарифмический декремент определяется следующим образом:

$$\xi_i = \frac{\sum_{i=1}^m \xi_i \cdot \Sigma_{s_i}}{\sum_{i=1}^m \Sigma_{s_i}}. \quad (21)$$

### 1.5.1 Расчет микроскопических и макроскопических сечений для $U^{235}$

$f_a = 0,96$  – поправочный коэффициент для  $U^{235}$ ;

$f_f = 0,96$  – поправочный коэффициент для  $U^{235}$ ;

$\sigma_{a0} = 683$  барн – табличное значение сечения поглощения  $U^{235}$ ;

$\sigma_{f0} = 582$  барн – табличное значение сечения деления  $U^{235}$ .

Тогда, с учетом поправок, сечения для  $U^{235}$  пересчитываются по формулам (14) и (15):

$$\sigma_a^{U^{235}} = 683 \cdot 0,884 \cdot 0,96 \cdot \sqrt{\frac{293}{393}} = 500,474 \text{ барн};$$

$$\sigma_f^{U^{235}} = 582 \cdot 0,884 \cdot 0,96 \cdot \sqrt{\frac{293}{393}} = 426,466 \text{ барн};$$

$$\sigma_s^{U^{235}} = 15 \text{ барн};$$

$$\sigma_c^{U^{235}} = 101 \text{ барн};$$

$$\mu_s^{U^{235}} = 0;$$

$$\sigma_{tr}^{U^{235}} = 500,474 + 15 \cdot (1 - 0) = 515,474 \text{ барн};$$

$$\Sigma_a^{U^{235}} = 500,474 \cdot 10^{-24} \cdot 4,55 \cdot 10^{20} = 0,205 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_f^{U^{235}} = 426,466 \cdot 10^{-24} \cdot 4,55 \cdot 10^{20} = 0,175 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_s^{U^{235}} = 15 \cdot 10^{-24} \cdot 4,55 \cdot 10^{20} = 0,006 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_{tr}^{U^{235}} = 515,474 \cdot 10^{-24} \cdot 4,55 \cdot 10^{20} = 0,211 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_c^{U^{235}} = 101 \cdot 10^{-24} \cdot 4,55 \cdot 10^{20} = 0,041 \text{ см}^{-1};$$

$$\xi^{U^{235}} = 1 + \frac{(235 - 1)^2}{2 \cdot 235} \cdot \ln\left(\frac{235 - 1}{235 + 1}\right) = 8,49 \cdot 10^{-3};$$

$$\xi \Sigma_s^{U^{235}} = 8,49 \cdot 10^{-3} \cdot 0,006 = 5,21 \cdot 10^{-5} \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_a^{U^{235}}(\text{r1}) = 500,474 \cdot 10^{-24} \cdot 1,25 \cdot 10^{20} = 0,063 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_f^{U^{235}}(\text{r1}) = 426,466 \cdot 10^{-24} \cdot 1,25 \cdot 10^{20} = 0,053 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_s^{U^{235}}(\text{r1}) = 15 \cdot 10^{-24} \cdot 1,25 \cdot 10^{20} = 0,002 \text{ см}^{-1};$$

$$\sum_{tr}^{U^{235}}(\Gamma_1) = 515,474 \cdot 10^{-24} \cdot 1,25 \cdot 10^{20} = 0,064 \text{ см}^{-1};$$

$$\sum_c^{U^{235}}(\Gamma_1) = 101 \cdot 10^{-24} \cdot 1,25 \cdot 10^{20} = 0,013 \text{ см}^{-1};$$

$$\xi \sum_s^{U^{235}}(\Gamma_1) = 8,49 \cdot 10^{-3} \cdot 0,002 = 1,59 \cdot 10^{-5} \text{ см}^{-1};$$

$$\sum_a^{U^{235}}(\Gamma_2) = 500,474 \cdot 10^{-24} \cdot 2,71 \cdot 10^{20} = 0,136 \text{ см}^{-1};$$

$$\sum_f^{U^{235}}(\Gamma_2) = 426,466 \cdot 10^{-24} \cdot 2,71 \cdot 10^{20} = 0,115 \text{ см}^{-1};$$

$$\sum_s^{U^{235}}(\Gamma_2) = 15 \cdot 10^{-24} \cdot 2,71 \cdot 10^{20} = 0,004 \text{ см}^{-1};$$

$$\sum_{tr}^{U^{235}}(\Gamma_2) = 515,474 \cdot 10^{-24} \cdot 2,71 \cdot 10^{20} = 0,139 \text{ см}^{-1};$$

$$\sum_c^{U^{235}}(\Gamma_2) = 101 \cdot 10^{-24} \cdot 2,71 \cdot 10^{20} = 0,027 \text{ см}^{-1};$$

$$\xi \sum_s^{U^{235}}(\Gamma_2) = 8,49 \cdot 10^{-3} \cdot 0,004 = 3,45 \cdot 10^{-5} \text{ см}^{-1};$$

Для остальных элементов результаты расчет микроскопических и макроскопических сечений представлены в приложении Б.

## 1.6 Расчет коэффициента размножения для бесконечной среды

Коэффициент размножения бесконечной среды является важной характеристикой активной зоны реактора, т. к. по его величине можно судить о целесообразности продолжения расчёта.

Коэффициент размножения для бесконечной среды определяется как произведение четырёх сомножителей:

$$k_{\infty} = \mu \cdot \varphi \cdot \theta \cdot \eta, \quad (22)$$

где  $\mu$  – коэффициент размножения на быстрых нейтронах;

$\varphi$  – вероятность избежать резонансного захвата;

$\theta$  – коэффициент использования тепловых нейтронов;

$\eta$  – коэффициент выхода нейтронов на одно поглощение.

### 1.6.1 Расчет коэффициента выхода нейтронов на одно поглощение

Топливо применяется в виде сплава и выражение для  $\eta$  имеет вид:

$$\eta = \nu_f \cdot \frac{\sum_f^{\text{топ}}}{\sum_a^{\text{топ}}}, \quad (23)$$

где  $\nu_f$  – число нейтронов, которое испускается при одном акте деления.

$$\eta = 2,42 \cdot \frac{0,053}{0,063} = 1,683.$$

### 1.6.2 Расчет коэффициента размножения на быстрых нейтронах

Величина  $\mu$  (коэффициент размножения на быстрых нейтронах) в гетерогенном реакторе зависит от формы, размеров и расположения топливного блока, а также от диффузионных свойств топлива.

При расчете величины  $\mu$  для стержневых и трубчатых ТВЭЛов можно воспользоваться формулой:

$$\mu = \mu_{\text{бл}} + \frac{\mu_{\infty} - \mu_{\text{бл}}}{1 + 2,3 \frac{N_H}{N_{U^{238}}}}, \quad (24)$$

где  $\mu_{\infty} = 1,19$ ;

$\frac{N_H}{N_{U^{238}}}$  – отношение числа атомов водорода к числу атомов урана в

активной зоне;

$\mu_{\text{бл}}$  – коэффициент размножения на быстрых нейтронах для одиночного блока, но помещенного в разреженную решетку.

Уран-водное отношение  $\frac{N_H}{N_{U^{238}}}$  находится следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{N_H}{N_{U^{238}}} &= 2 \cdot \frac{S_{\text{тн}} \cdot H_{\text{аз}} \cdot \rho_{\text{тн}} \cdot 238}{S_{\text{топ}} \cdot H_{\text{аз}} \cdot \rho_{\text{топ}} \cdot 18 \cdot (1 - C_{U^{235}})} = \\ &= 2 \cdot \frac{0,98 \cdot 0,751 \cdot 238}{0,44 \cdot 10,2 \cdot 18 \cdot (1 - 0,018)} = 3,375; \end{aligned} \quad (25)$$

$$\mu_{\text{бл}} = 1 + \frac{0,092 \cdot P}{1 - 0,52 \cdot P} \cdot \mu_1; \quad (26)$$

$$\mu_1 = \frac{N_{U^{238}}}{N_{U^{238}(\text{прир})}} \quad (27)$$

где  $P$  – вероятность того, что быстрый нейтрон испытывает какое-либо столкновение с ядром  $U^{238}$  (определяется из графической зависимости и зависит от геометрических размеров и формы топливного блока);

$\mu_1$  – пористость блока по  $U^{238}$ ;

$N_{U^{238}(\text{прир})}$  – число ядер  $U^{238}$  в  $1 \text{ см}^3$  естественного урана;

$N_{U^{238}}$  – число ядер  $U^{238}$  в  $1 \text{ см}^3$  блока.

$$\mu_1 = \frac{5,307 \cdot 10^{22}}{(19,5 \cdot 0,993 \cdot 6,023 \cdot 10^{23})} = 0,455.$$

Значение  $P$  определяется по рисунку 5:

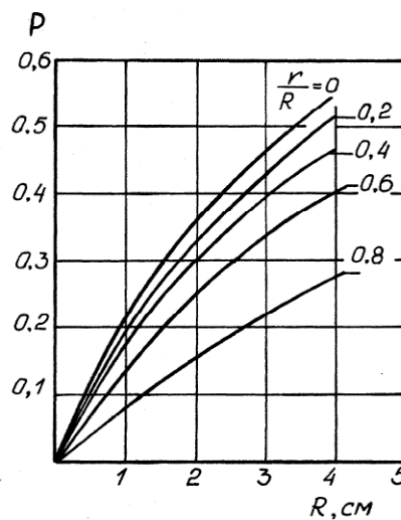


Рисунок 5 – График вероятности столкновения быстрого нейтрона с ядром  $U^{238}$

Из графика для  $R_{\text{топ}} = 0,3765 \text{ см}$  принимаем  $P = 0,1$ :

$$\mu_{\text{бл}} = 1 + \frac{0,092 \cdot 0,1}{1 - 0,52 \cdot 0,1} \cdot 0,455 = 1,004;$$

$$\mu = 1,004 + \frac{1,19 - 1,004}{1 + 2,3 \cdot 3,375} = 1,021.$$

### 1.6.3 Расчет коэффициента использования тепловых нейтронов

Для расчета данного коэффициента можно использовать второй вид гомогенизации, при котором гетерогенная ячейка заменяется двухзонной.

Расчет  $\theta$  в этом случае ведут в два этапа. Сначала определяют величину  $\theta'_{\text{ф.б.}}$ , представляющую собой отношение числа тепловых нейтронов,

поглощенных в фиктивном блоке, к общему числу поглощенных тепловых нейтронов:

$$\frac{1}{\theta'_{\text{ф.б.}}} = 1 + F \cdot \frac{S_{\text{тн}} \cdot \Sigma_{\text{а}}^{\text{тн}}}{S_{\text{ф.б.}} \cdot \Sigma_{\text{а}}^{\Phi}} + (E - 1). \quad (28)$$

Для цилиндрического уранового стержня коэффициент экранирования:

$$F = \frac{1}{2} \frac{R_{\text{ф.б.}} \cdot I_0\left(\frac{R_{\text{ф.б.}}}{L_{\text{ф.б.}}}\right)}{L_{\text{ф.б.}} \cdot I_1\left(\frac{R_{\text{ф.б.}}}{L_{\text{ф.б.}}}\right)}. \quad (29)$$

Фактор, учитывающий избыточное поглощение нейтронов в замедлителе ( $E - 1$ ):

$$(E - 1) = 0,5 \cdot \left(\frac{R_{\text{зам}}}{L_{\text{зам}}}\right)^2 \cdot \left(\ln\left(\frac{R_{\text{зам}}}{R_{\text{ф.б.}}}\right) - 0,75\right). \quad (30)$$

Затем рассчитывают коэффициент использования тепловых нейтронов по формуле:

$$\theta = \theta'_{\text{ф.б.}} \cdot \theta_0, \quad (31)$$

где  $\theta_0$  – коэффициент использования тепловых нейтронов внутри фиктивного блока.

$$\theta_0 = \frac{\Sigma_{\text{а}}^{\text{топ}}(\text{Г}2)}{\Sigma_{\text{а}}^{\Phi}}. \quad (32)$$

Параметры необходимые для расчёта:

$$R_{\text{ф.б.}} = R_{\text{ТВЭЛ}} = 0,455 \text{ см};$$

$$R_{\text{зам}} = \sqrt{\frac{S_{\text{яч}}}{\pi}} = \sqrt{\frac{1,408}{\pi}} = 0,67 \text{ см}.$$

С помощью усреднённых сечений по фиктивному блоку длина диффузии определяется таким образом:

$$L_{\text{ф.б.}} = \sqrt{\frac{1}{3 \cdot \Sigma_{\text{а}}^{\Phi} \cdot \Sigma_{\text{tr}}^{\Phi}}} = \sqrt{\frac{1}{3 \cdot 0,168 \cdot 0,541}} = 1,916;$$

$$L_{\text{зам}} = \sqrt{\frac{1}{3 \cdot \Sigma_a^{\text{ТН}} \cdot \Sigma_{tr}^{\text{ТН}}}} = \sqrt{\frac{1}{3 \cdot 0,022 \cdot 2,31}} = 2,555;$$

$$(E - 1) = 0,5 \cdot \left(\frac{0,67}{2,555}\right)^2 \cdot \left(\ln\left(\frac{0,67}{0,455}\right) - 0,75\right) = -0,062;$$

$$F = \frac{1}{2} \frac{0,455 \cdot I_0\left(\frac{0,455}{1,915}\right)}{1,915 \cdot I_1\left(\frac{0,455}{1,915}\right)} = 1,007;$$

$$\frac{1}{\theta'_{\text{ф.б.}}} = 1 + 1,007 \cdot \frac{0,757 \cdot 0,022}{0,65 \cdot 0,541} - 0,069 = 1,093;$$

тогда  $\theta'_{\text{ф.б.}} = 0,915$ .

$$\theta_0 = \frac{0,166}{0,168} = 0,99.$$

Подставив  $\theta'_{\text{ф.б.}}$  и  $\theta_0$  в формулу (31) коэффициент использования тепловых нейтронов равен:

$$\theta = 0,915 \cdot 0,99 = 0,905.$$

#### 1.6.4 Расчет вероятности избежать резонансного захвата

В энергетических ядерных реакторах, как правило, применяются сборки твэлов, которые состоят из нескольких блоков ядерного горючего. Для ячейки со стрержневыми блоками коэффициент  $\varphi$  рассчитывается по формуле:

$$\varphi = \exp\left(-\frac{k_T \cdot R_U \cdot \sqrt{R_U \cdot \mu_1} + 0,73 \cdot R_U^2 \cdot \mu_1}{\xi \Sigma_S^{\text{ТН}} \cdot S_{\text{зам}} + \xi \Sigma_S^{\Phi} \cdot S_{\text{ф.б.}}}\right), \quad (33)$$

где  $k_T$  – температурный коэффициент;

$\mu_1$  – пористость блока по  $U^{238}$ ;

$R_U$  – радиус уранового блока, см;

$\xi \Sigma_S^{\text{ТН}}$  и  $\xi \Sigma_S^{\Phi}$  – замедляющая способность замедлителя и фиктивного блока соответственно.

Коэффициент  $k_T$  вычисляется по формуле:



$$k_T = 0,775 \cdot (1 + 17,5 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{T_{\text{топ}}}). \quad (34)$$

При температуре  $T = 293$  К температурный коэффициент равен:

$$k_T = 0,775 \cdot (1 + 17,5 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{293}) = 1,007.$$

$$\varphi = \exp\left(-\frac{1,007 \cdot 0,3765 \cdot \sqrt{0,3765 \cdot 0,456} + 0,73 \cdot 0,3765^2 \cdot 0,456}{1,35 \cdot 0,757 + 0,019 \cdot 0,65}\right) = 0,82.$$

Подставив найденные значения коэффициентов  $\mu$ ,  $\varphi$ ,  $\theta$ ,  $\eta$  в формулу (22) найдём коэффициент размножения для бесконечной среды:

$$k_\infty = 1,021 \cdot 0,82 \cdot 0,905 \cdot 1,683 = 1,284.$$

## 1.7 Оптимизация параметров ячейки

После расчета  $k_\infty$  необходимо подобрать такие параметры ячейки, при которых данный коэффициент будет максимальным. В некоторых диапазонах варьировались шаг расстановки твэлов и радиус топливного блока. Полученные зависимости изображены на рисунках 6-7.

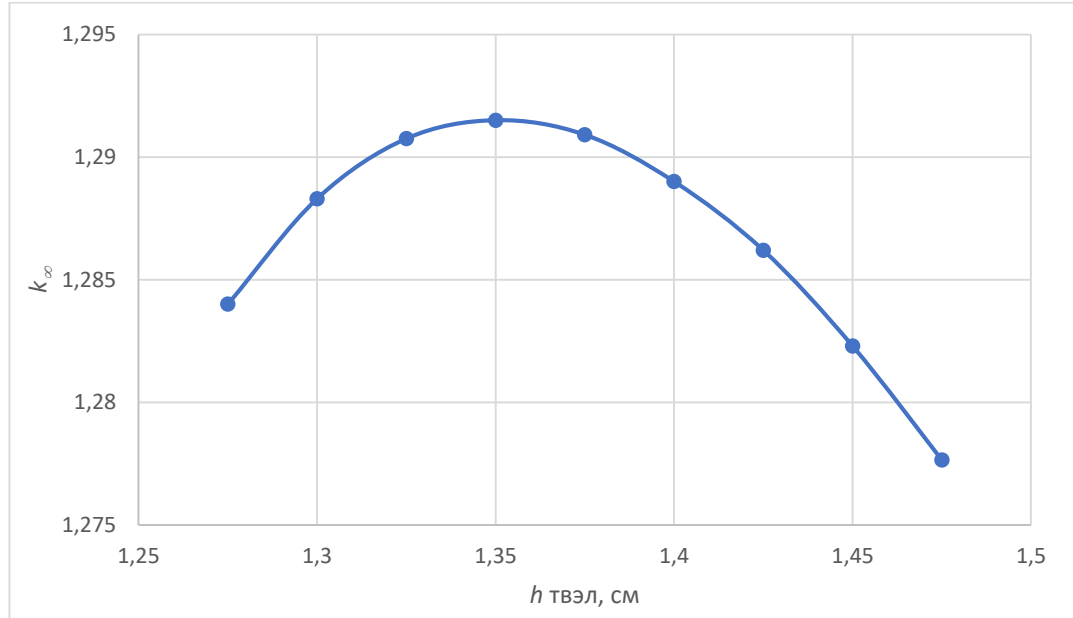


Рисунок 6 – Зависимость  $k_\infty$  от шага расстановки твэлов

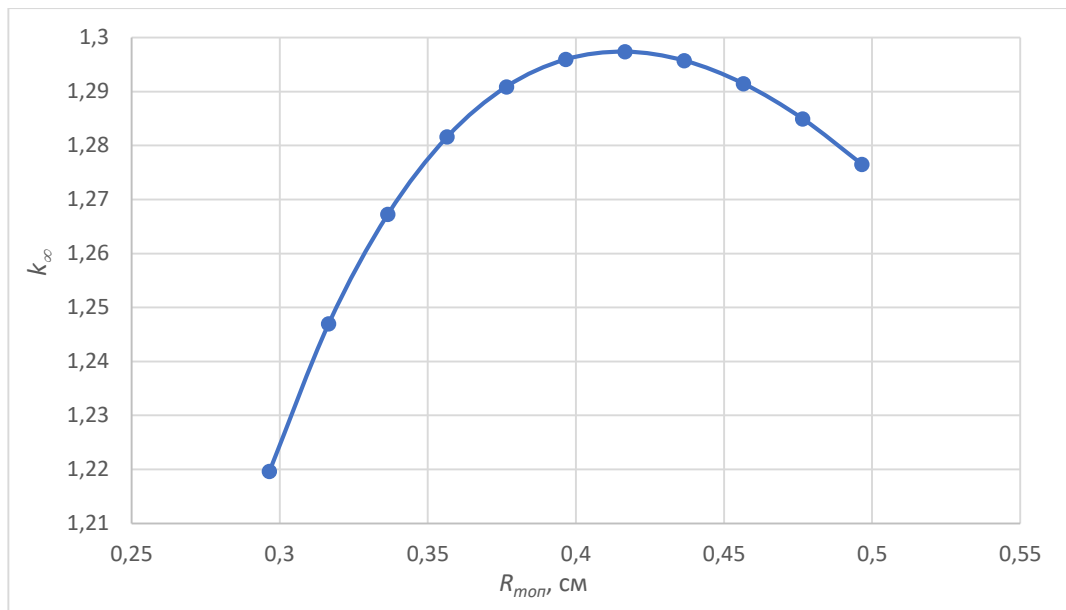


Рисунок 7 – Зависимость  $k_{\infty}$  от внешнего радиуса топливного блока

Зависимость на рисунке 6 объясняется не одним фактором. Начальное увеличение  $k_{\infty}$  связано с тем, что вероятность избежать резонансного захвата в «редких» решетках выше, чем в «тесных». Объем замедлителя в них больше, соответственно, нейтроны могут замедлиться до слабых резонансных или тепловых уровней, на которых вероятность захвата меньше. Уменьшение  $k_{\infty}$  связано с проявлением внешнего блок-эффекта. Кроме того, в «редких» решетках значение коэффициента размножения быстрых нейтронов тоже меньше, чем в «тесных», так как быстрые нейтроны замедляются до подпороговых и не могут инициировать деление  $U^{238}$ .

На рисунке 7 наблюдается проявление внутренних и внешних блок-эффектов, которые сильно влияют на коэффициент использования тепловых нейтронов. Уменьшение  $k_{\infty}$  на рисунке 7 объясняется усилением внутреннего блок-эффекта, потому что увеличивается значение плотности потока тепловых нейтронов на поверхности топливного блока. После анализа полученных зависимостей было выбрано оптимальное значение  $k_{\infty} = 1,297$ , при котором  $h_{яч} = 1,375 \text{ см}$ ,  $R_{топ} = 0,4165 \text{ см}$ ,  $v = 5,3 \text{ м/с}$ .

Таким образом, получившаяся скорость прокачки теплоносителя удовлетворяет установленным требованиям ( $v < 10$  м/с – для реакторов типа ВВЭР).

Но если обратиться ко всем известным источникам, то для реактора ВВЭР-1000 не рекомендуют брать шаг решетки больше, чем 1,275 см, так как это приведет к уменьшению массы загружаемого топлива, а это отрицательно сказывается на работу ядерного реактора.

## 1.8 Расчет эффективного коэффициента размножения ЯР

Эффективный коэффициент размножения вычисляется:

$$k_{эф} = \frac{k_{\infty} \cdot \exp(-B^2 \cdot \tau_p)}{1 + B^2 \cdot L_p^2}, \quad (35)$$

где  $L_p^2$  – квадрат длины диффузии в решетке;

$\tau_p$  – возраст нейтронов в решётке;

$B^2$  – геометрический параметр.

Квадрат длины диффузии в решетке рассчитывается по формуле:

$$L_p^2 = L_{зам}^2 \cdot (1 - \theta) + L_{ф.б.}^2 \cdot \theta; \quad (36)$$

$$L_p^2 = 2,555^2 \cdot (1 - 0,906) + 1,916^2 \cdot 0,906 = 3,939 \text{ см}^2.$$

Возраст нейтронов в решетке оценивается по приближенной формуле:

$$\tau_p = \tau_{зам} \left( \frac{S_{яч}}{S_{зам}} \right)^{0,5}, \quad [\text{см}^2], \quad (37)$$

где  $\tau_{зам}=27,3$  см – возраст нейтронов в замедлителе.

$$\tau_p = 27,3 \left( \frac{1,408}{0,757} \right)^{0,5} = 25,36 \text{ см}^2.$$

Для реактора с отражателем необходимо учитывать эффективную добавку за счет отражателя ( $\delta$ ). Так, для цилиндрического реактора:

$$B^2 = \left( \frac{\pi}{H_э} \right)^2 + \left( \frac{2,405}{R_э} \right)^2, \quad (38)$$

где  $H_э, R_э$  – эквивалентные размеры реактора, см;

$\delta$  – эффективная добавка за счет отражателя, см.

Эквивалентные размеры реактора рассчитываются по формулам:

$$H_{\text{Э}} = H_{\text{аз}} + 2\delta, [\text{см}]; \quad (39)$$

$$R_{\text{Э}} = \frac{D_{\text{аз}}}{2} + \delta, [\text{см}]. \quad (40)$$

Для водо-водяных реакторов с водным отражателем:

$$\delta = 7,2 + 0,1 \cdot (M^2 - 40), [\text{см}]. \quad (41)$$

где  $M^2$  – площадь миграции в отражателе, см<sup>2</sup>.

Подставив численные величины в формулы (38), (39), (40), (41), значения искомых параметров равны:

$$M^2 = \tau_{\text{зам}} + L_{\text{зам}}^2 = 27,3 + 2,555^2 = 33,829 \text{ см}^2;$$

$$\delta = 7,2 + 0,1 \cdot (33,829 - 40) = 6,583 \text{ см.}$$

$$H_{\text{Э}} = 248,82 + 2 \cdot 6,583 = 261,986 \text{ см};$$

$$R_{\text{Э}} = \frac{226,206}{2} + 6,583 = 119,686;$$

$$B^2 = \left( \frac{\pi}{261,986} \right)^2 + \left( \frac{2,405}{119,686} \right)^2 = 5,47 \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-2};$$

Подставив полученные значения в формулу (35), определим эффективный коэффициент размножения:

$$k_{\text{Эф}} = \frac{1,297 \cdot \exp(-5,47 \cdot 10^{-4} \cdot 25,36)}{1 + 5,47 \cdot 10^{-4} \cdot 3,939} = 1,255.$$

## Заключение

В ходе данной кратко рассмотрены характеристики реакторной установки типа ВВЭР.

Для элементарной ячейки данного реактора были подсчитаны скорость прокачки теплоносителя  $v = 5,96$  м/с, концентрации, микросечения и макросечения для каждого из элементов для гетерогенной, гомогенизированной ячейки и фиктивного блока.

Были определены коэффициенты в формуле 4-х сомножителей:  $\eta = 1,683$ ,  $\mu = 1,021$ ,  $\theta = 0,905$ ,  $\varphi = 0,82$ . Затем был найден коэффициент размножения в бесконечной среде  $k_{\infty} = 1,284$ .

Также была проведена оптимизация, в которой было получено значение коэффициента размножения в бесконечной среде  $k_{\infty} = 1,297$ , что соответствует  $h_{\text{яч}} = 1,375$  см,  $R_{\text{топ}} = 0,4165$  см и  $v = 5,3$  м/с.

Кроме того, эффективный коэффициент размножения  $k_{\text{эф}} = 1,255$ .

## Список литературы

1. Абагян Л.П. Групповые константы для расчета ядерных реакторов и защиты: Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1981
2. Окунев В.С. Основы прикладной ядерной физики и введение в физику ядерных реакторов: учебное пособие – М: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. – 534 с.
3. Острейкин В. А. Эксплуатация атомных станций: учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1999. – 928 с.
4. Конышин В. А. Ядерно-физические константы делящихся ядер: Справочник. – М., Энергоатомиздат, 1984. с. 457
5. Колпаков Г.Н., Кошелев Ф.П., Шаманин И.В. Нейтронно-физический и теплогидравлический расчет реактора на тепловых нейтронах. Часть I: Учебное пособие. – Томск: Издательство ТПУ, 1997.
6. СТО ТПУ 2.5.01–2006. Система образовательных стандартов. Работы выпускные квалификационные, проекты и работы курсовые. Структура и правила оформления. – Введ. 2006. – 04 – 30

## Приложение А

(обязательное)

Таблица А.1- Гетерогенные и гомогенизированные концентрации всех элементов

Материал	Величина		
	$N, 10^{22}$ ядер/см <sup>3</sup>	$N^{\Gamma 1}, 10^{22}$ ядер/см <sup>3</sup>	$N^{\Gamma 2}, 10^{22}$ ядер/см <sup>3</sup>
UO <sub>2</sub>	2,2754	-	-
U <sup>235</sup>	0,0409	0,0125	0,0271
U <sup>238</sup>	2,2344	0,6824	1,4779
O(топ)	4,5507	1,3897	3,0100
H <sub>2</sub> O	3,3461	-	-
H	6,6922	3,6005	3,8992
O(тн)	3,3461	2,1169	7,7984
Zr	4,2691	0,5324	1,1333
He	2,6872	0,0001	0,002

## Приложение Б

(обязательное)

Таблица Б.1 – Микроскопические и макроскопические сечения всех элементов

Материал	Величина									
	$\sigma_a, б$	$\sigma_f, б$	$\sigma_s, б$	$\mu_s, б$	$\sigma_{tr}, б$	$\Sigma_a, см^{-1}$	$\Sigma_s, см^{-1}$	$\Sigma_{tr}, см^{-1}$	$\xi$	$\xi\Sigma_s, см^{-1}$
UO <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	0,2511	0,2072	0,6218	0,0587	0,01216
U <sup>235</sup>	500,474	426,466	15	0	515,474	0,2049	0,0061	0,211	0,0085	0,000052
U <sup>238</sup>	2,069	-	9	0	110,685	0,0462	0,2011	0,247	0,0083	0,0017
O(топ)	-	-	3,75	0,04	3,6	-	0,1706	0,1638	0,12	0,0205
H <sub>2</sub> O	-	-	-	-	-	0,022	2,67	2,31	0,5056	1,3500
H	0,2433	-	20,30	0,667	7,0032	0,016	1,3585	0,045	1,2	1,6302
O(тн)	-	-	3,75	0,04	3,6	0,125	0,0013	0,120	0,12	0,0002
Zr	1,412	-	6,2	0,01	114,27	0,0007	0,4867	0,0598	0,0353	0,0093



Таблица Б.2 – Макроскопические сечения элементов после гомогенизации 1 и 2 рода

Материал	Величина									
	1-я гомогенизация					2-я гомогенизация				
	$\Sigma_a, \text{см}^{-1}$	$\Sigma_s, \text{см}^{-1}$	$\Sigma_{tr}, \text{см}^{-1}$	$\xi$	$\xi\Sigma_s, \text{см}^{-1}$	$\Sigma_a, \text{см}^{-1}$	$\Sigma_s, \text{см}^{-1}$	$\Sigma_{tr}, \text{см}^{-1}$	$\xi$	$\xi\Sigma_s, \text{см}^{-1}$
UO <sub>2</sub>	0,077	0,373	0,304	0,0594	0,0222	0,1676	0,2499	0,5411	0,0587	0,14669
U <sup>235</sup>	0,063	0,002	0,064	0,0085	0,000016	0,1356	0,0041	0,139	0,0085	0,000035
U <sup>238</sup>	0,014	0,2011	0,076	0,0084	0,0017	0,0306	0,1330	0,1636	0,0083	0,00111
O(топ)	0	0,1707	0,164	0,12	0,0205	0	0,1128	0,1084	0,12	0,01354
H	0,0087	0,7309	0,2521	1,2	1,6302	0,0095	0,7915	0,0260	1,2	0,9498
O(тн)	0,0794	0,00085	0,0762	0,12	0,0001	0,2924	0,0031	0,2507	0,12	0,00037
Zr	0,0007	0,2647	0,0328	0,0353	0,0093	0,0007	0,4867	0,0598	0,0353	0,1718