

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»



Инженерная школа ядерных технологий  
Отделение ядерно-топливного цикла

14.03.02 «Ядерная физика и технологии»

Нейтронно-физический расчет ядерного реактора

КУРСОВОЙ ПРОЕКТ

по дисциплине:  
**Междисциплинарный проект**

**Исполнитель:**

студент группы

0А93

17.11.2022

**Руководитель:**

доцент, к. ф.-м. н.

Чертков Юрий Борисович

Томск - 2022

Задание на курсовой проект  
для профиля «Ядерные реакторы и энергетические установки»  
«Нейтронно-физический расчет ядерного реактора»  
студенту гр. 0А93В Веретенникову Дмитрию Геннадьевичу

1. Исходные данные:

- тип реактора: ВВЭР;
- тепловая мощность: 1400 МВт;
- ядерное горючее:  $UO_2$ ;
- обогащение топлива по U-235: 2.3 %;
- теплоноситель: вода;
- температура теплоносителя на входе: 260 °С;
- температура теплоносителя на выходе: 280 °С;
- тип ТВЭлов: стержневые ТВЭлы с наружным охлаждением;
- материал оболочек ТВЭлов и кассет: сталь 1Х18Н9Т.

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.
- многогрупповой расчет спектра нейтронов и коэффициента размножения;

3. Необходимо представить:

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

## Содержание

Введение.....	4
1 Водо-водяные энергетические реакторы.....	5
2 Предварительный расчёт.....	8
3 Ядерно-физические характеристики «холодного» реактора.....	12
3.1 Ядерные концентрации материалов.....	12
3.2 Гомогенизация.....	15
3.2.1 Гомогенизация первого вида.....	16
3.2.2 Гомогенизация второго вида.....	17
3.3 Сечения взаимодействий материалов с нейтронами.....	19
4 Коэффициент размножения нейтронов.....	23
4.1 Коэффициент размножения на быстрых нейтронах.....	23
4.2 Вероятность избежать резонансного захвата.....	25
4.3 Коэффициент использования тепловых нейтронов.....	25
4.4 Выход нейтронов на одно поглощение.....	27
5 Оптимизация параметров ячейки.....	27
6 Эффективный коэффициент размножения.....	29
7 Многогрупповой расчёт.....	31
Заключение.....	37
Список литературы.....	38
Приложение А.....	39
Приложение Б.....	40
Приложение В.....	42

## Введение

Отрасль ядерной энергетики, являясь одновременно и хорошо развитой сейчас, и достаточно перспективной в обозримом будущем, играет важную роль в России и в других странах. Её развитие и распространение во многом способствует улучшению качества жизни населения ввиду уменьшения выбросов продуктов горения традиционных видов топлива и потенциального снижения цен на электроэнергию.

На данный момент в России доля электроэнергии, вырабатываемой на атомных электростанциях, составляет около 20 % от всего объема выработки. В общей сложности на 11 отечественных АЭС эксплуатируются 37 энергоблоков, из которых 22 – с реакторами типа ВВЭР. Из них 13 энергоблоков – ВВЭР-1000, 4 энергоблока – ВВЭР-1200 и 5 энергоблоков – ВВЭР-440. Реакторы типа ВВЭР успешно прошли проверку временем и теперь можно наблюдать стабильное распространение такие реакторов по миру и их усовершенствование – к примеру, АЭС на основе ВВЭР-1200 обладают повышенным уровнем безопасности, благодаря чему их относят к поколению «3+» [1].

В рамках данной работы необходимо провести нейтронно-физический расчёт реактора типа ВВЭР, являющийся необходимым этапом при проектировании ядерного реактора. Для достижения данной цели нужно выполнить ряд задач:

- выявить особенности конструкции реактора типа ВВЭР;
- провести предварительный расчёт;
- рассчитать ядерно-физические характеристики «холодного» реактора;
- рассчитать эффективный коэффициент размножения нейтронов;
- оптимизировать параметры ячейки;
- провести многогрупповой расчёт спектра нейтронов и коэффициента размножения.

## 1 Водо-водяные энергетические реакторы

Реакторы типа ВВЭР являются гетерогенными, корпусными, водо-водяными под давлением, работают на тепловых нейтронах. Данный тип предназначен для преобразования энергии деления ядер урана в тепловую энергию и нагревание теплоносителя первого контура. Нагретый теплоноситель первого контура поступает с помощью насоса в теплообменник (парогенератор), где передает часть своего тепла воде второго контура. Генерируемый в парогенераторе пар поступает в турбогенератор, преобразующий энергию пара в электрическую.

ВВЭР обладают множеством достоинств, среди которых:

- доступность воды, которая используется и в качестве теплоносителя, и в качестве замедлителя;
- эффективность воды как теплоносителя;
- высокое энерговыделение благодаря высокой замедляющей способности
- четыре барьера безопасности, повышенная безопасность благодаря использованию двух контуров;
- малый размер при сравнении с другими типами реакторов такой же мощности.

Основные недостатки связаны в основном с использованием воды:

- коррозия конструкционных материалов;
- необходимость поддержания высокого давления в корпусе;
- поглощение части нейтронов водой;
- неравномерность энерговыделения по причине высокой замедляющей способности;
- радиолиз воды.

Кроме того, на реакторе используется обогащенное до 5% по  $U^{235}$  топливо. При обогащении топлива образуются отходы, и возникают издержки, которых нет в случае, например, быстрых реакторов.

В состав реактора ВВЭР-1000 входят корпус, блок верхний, внутрикорпусные устройства. активная зона, блок электроразводок и датчики системы внутрореакторного контроля.

Внутрикорпусные устройства (шахта внутрикорпусная, выгородка, блок защитных труб), активная зона (тепловыделяющие сборки, сборки поглощающих стержней системы управления и защиты, пучки стержней выгорающего поглотителя) и механизмы перемещения приводов СУЗ размещаются внутри вертикального сосуда высокого давления (внутри корпуса с крышкой) и омываются теплоносителем первого контура. Блоки электромагнитов приводов СУЗ размещаются снаружи чехлов и охлаждаются воздухом принудительно. Штанги приводов СУЗ соединены с ПС СУЗ и перемещаются совместно с ними.

Главный разъем реактора уплотняется крышкой, на патрубках которой установлены чехлы с приводами СУЗ и фланцы с выводами коммуникации датчиков системы ВРК. Крышка и чехлы с приводами СУЗ входят в состав блока верхнего.

Съемные коммуникации между электрическими разъемами блока верхнего и бетонной шахты закрепляются и транспортируются на блоке электроразводок.

Корпус реактора имеет 8 патрубков Ду 850 для присоединения трубопроводов главного циркуляционного контура и 4 патрубка Ду 300 для присоединения трубопроводов САОЗ. Корпус опирается через опорное кольцо на ферму опорную. Корпус и кольцо имеют шпоночные сопряжения, которые удерживают корпус при воздействии усилий от трубопроводов, от сейсмических и вибрационных нагрузок и т.д. Усилия от корпуса воспринимаются также фермой упорной. Эти усилия передаются от корпуса на кронштейны фермы через сопряжение «шпонка-паз».

Дополнительное удержание блока верхнего от перемещения в горизонтальной плоскости производится за счет упоров, установленных с малыми зазорами между траверсой БВ и бетонной шахтой.

Фланец шахты внутрикорпусной опирается на фланец корпуса. Шахта центрируется в корпусе и удерживается от поперечных перемещений нижними и верхними шпонками, приваренными к корпусу. В средней (по высоте) части шахта центрируется и удерживается от вибрации разделительным кольцом, расположенным между входными и выходными патрубками Ду 850. Шахта внутрикорпусная имеет днище эллиптической формы, на котором закреплены опоры, установленные под каждой ТВС на координатах ячеек активной зоны. Днище шахты и опоры имеют отверстия для прохода теплоносителя в ТВС.

В шахте на уровне активной зоны размещена выгородка, охватывающая периферийный ряд ТВС. Выгородка является вытеснителем и защитным экраном.

Активная зона содержит 163 ТВС с шагом 236 мм. Каждая ТВС, установленная своим хвостовиком на опору, передает свою нагрузку на днище шахты внутрикорпусной. Головки ТВС содержат пружинные блоки. В направляющие каналы некоторых ТВС свободно устанавливаются неподвижные пучки СВП или перемещаемые ПС СУЗ. Пружинные блоки ТВС поджимаются блоком защитных труб (БЗТ) при установке крышки в реактор; это поджатие создает дополнительное усилие для удержания ТВС, шахты внутрикорпусной и БЗТ от всплытия в режимах НУЭ и Н НУЭ.

Нижняя плита БЗТ фиксирует головки ТВС и обеспечивает совмещение в плане направляющих каналов ТВС с направляющими каналами в защитных трубах БЗТ, что является необходимым условием для свободного (без затирания) перемещения ПС СУЗ по высоте активной зоны. В защитных трубах БЗТ перемещаются штанги приводов СУЗ и закрепленные на них ПС СУЗ, извлекаемые из активной зоны на заданную высоту. В БЗТ проходят направляющие каналы, в которые устанавливаются через патрубки БВ датчики системы внутриреакторного контроля. БЗТ центрируется шпонками относительно шахты по высоте на двух уровнях [2].

Общий вид реактора ВВЭР-1000 представлен на рисунке 1.

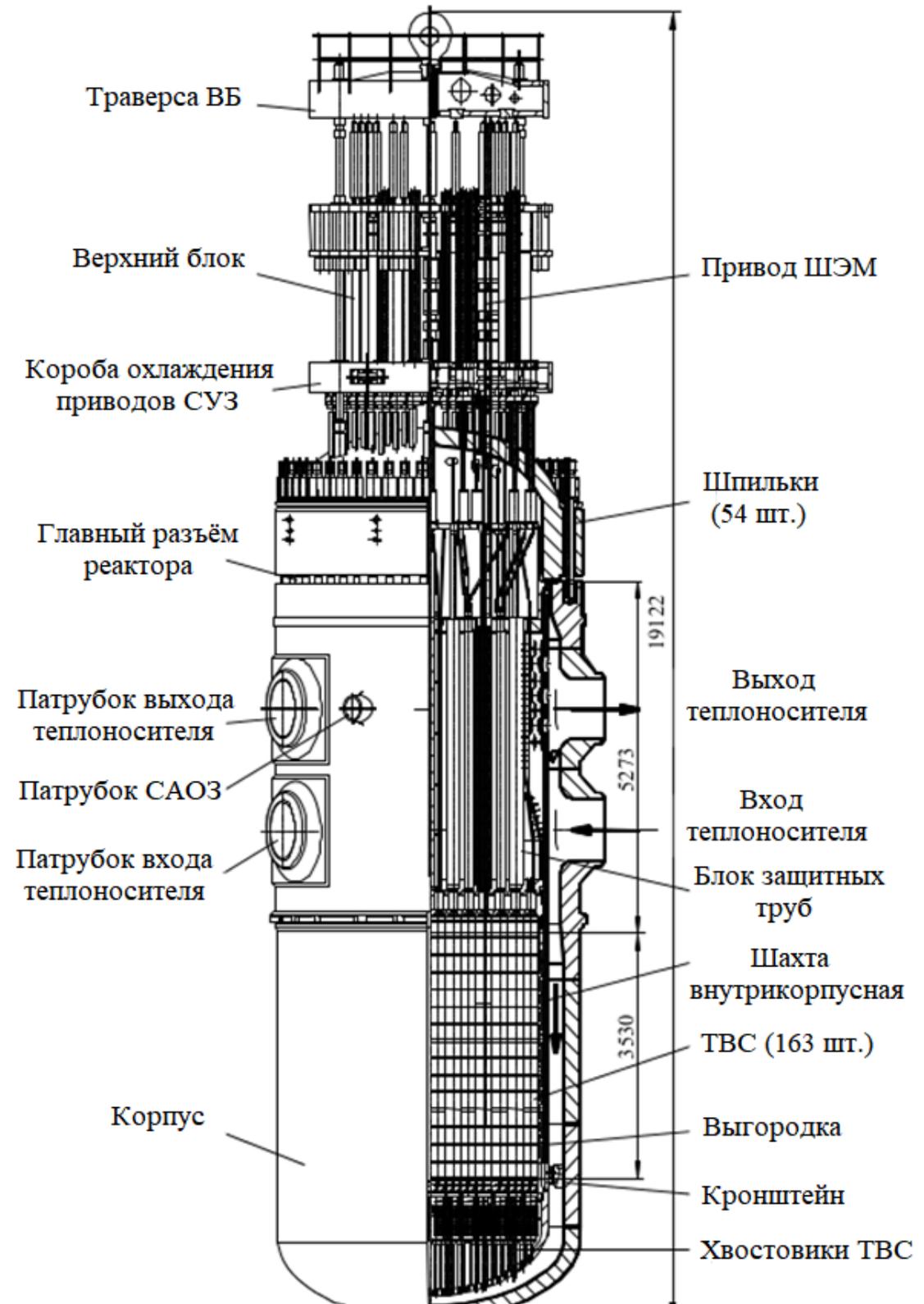


Рисунок 1 – Общий вид ВВЭР-1000 [3]

## 2 Предварительный расчёт

Для того, чтобы рассчитать нейтронно-физические параметры ядерного реактора на тепловых нейтронах, необходимо определить размеры активной

зоны в целях обеспечения требуемого теплосъёма при заданной мощности. Величины, необходимые для предварительного расчёта, представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Рабочие параметры реактора

Наименование параметра	Обозначение	Значение
Тепловая мощность, МВт	$N$	1400
Температура теплоносителя на входе, °С	$t_{\text{вх}}$	260
Температура теплоносителя на выходе, °С	$t_{\text{вых}}$	280
Средняя удельная объемная нагрузка, кВт/л	$\bar{N}_0$	120
Отношение высоты к диаметру	$m$	1,1
Коэффициент увеличения объёма реактора из-за размещения регулирующих стержней	$\eta$	1,1
Схемный коэффициент неравномерности тепловыделения	$K_v$	3
Осевой коэффициент неравномерности тепловыделения	$K_z$	1,5
Размер элементарной ячейки под ключ, см	$h_{\text{яч}}$	1,275
Внешний диаметр твэла, см	$D_{\text{ТВЭЛ}}$	0,91

Так как известно значение требуемой мощности реактора, размеры активной зоны оцениваются по следующим формулам:

$$V_{\text{а.з.}} = \frac{N}{\bar{N}_0} \eta, \text{ см}^3; \quad (1)$$

$$D_{\text{а.з.}} = \sqrt[3]{\frac{4V_{\text{а.з.}}}{\pi m}}, \text{ см}; \quad (2)$$

$$H_{\text{а.з.}} = mD_{\text{а.з.}}, \text{ см}, \quad (3)$$

где  $V_{\text{а.з.}}$ ,  $D_{\text{а.з.}}$ ,  $H_{\text{а.з.}}$  – объём, диаметр и высота активной зоны, см;

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

$m$  – отношение высоты к диаметру;

$N$  – тепловая мощность реактора, кВт;

$\eta$  – коэффициент увеличения объёма реактора из-за размещения регулирующих стержней.

Ввиду размещения регулирующих стержней, максимальная удельная объемная нагрузка активной зоны определяется как:

$$N_{0\max} = \bar{N}_0 K_v, \text{ кВт/л}, \quad (4)$$

где  $K_v$  – схемный коэффициент неравномерности тепловыделения.

Максимально допустимая тепловая нагрузка:

$$g_{\max} = \frac{N_{0\max} \cdot S_{\text{яч}}}{0,116 \cdot \Pi_0 \cdot n}, \text{ Гкал/м}^2 \cdot \text{ч}, \quad (5)$$

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

$n$  – число твэлов в кассете;

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

Скорость теплоносителя, необходимая для отвода тепла, определяется в максимально напряженном тепловыделяющем элементе из уравнения баланса тепла:

$$v = \frac{g_{\max} \cdot \Pi_0 \cdot H_{\text{а.з.}}}{3,6 \cdot K_z \cdot \gamma \cdot \Delta i \cdot S}, \text{ м/с}, \quad (6)$$

где  $v$  – скорость теплоносителя на входе, м/с;

$H_{\text{а.з.}}$  – высота активной зоны, см;

$K_z$  – осевой коэффициент неравномерности тепловыделения;

$S$  – площадь сечения прохода теплоносителя, приходящаяся на один тепловыделяющий элемент, см<sup>2</sup>;

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

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

Разность содержания теплоносителя на выходе определяется как:

$$\Delta i = C_p (t_{\text{вых}} - t_{\text{вх}}), \text{ ккал/кг}, \quad (7)$$

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

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

Объем активной зоны:

$$V_{\text{а.з.}} = \frac{N}{\bar{N}_0} \eta = \frac{1400}{120} \cdot 1,1 = 12,83 \text{ м}^3.$$

Диаметр активной зоны:

$$D_{\text{а.з.}} = \sqrt[3]{\frac{4V_{\text{а.з.}}}{\pi m}} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 12,83}{\pi \cdot 1,1}} = 2,46 \text{ м.}$$

Высота активной зоны:

$$H_{\text{а.з.}} = mD_{\text{а.з.}} = 1,1 \cdot 2,46 = 2,70 \text{ м.}$$

Максимальная удельная объемная нагрузка активной зоны:

$$N_{0\text{max}} = \bar{N}_0 K_v = 120 \cdot 3 = 360 \text{ кВт/л} = 0,36 \text{ кВт/см}^3.$$

Для того, чтобы определить максимально допустимую тепловую нагрузку, нужно рассчитать периметр тепловыделяющей поверхности твэла и площадь сечения элементарной ячейки.

Сечение элементарной ячейки имеет форму шестиугольника. Зная размер элементарной ячейки под ключ, площадь сечения можно найти как:

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

Так как сечение твэла имеет форму круга, то, зная внешний диаметр твэла, можно рассчитать периметр тепловыделяющей поверхности как:

$$\Pi_0 = \pi \cdot D_{\text{твэл}} = \pi \cdot 0,91 = 2,859 \text{ см.}$$

Максимально допустимая тепловая нагрузка:

$$g_{\text{max}} = \frac{N_{0\text{max}} \cdot S_{\text{яч}}}{0,116 \cdot \Pi_0 \cdot n} = \frac{0,36 \cdot 1,408}{0,116 \cdot 2,859 \cdot 1} = 1,528 \frac{\text{Гкал}}{\text{м}^2 \cdot \text{ч}} = 1,777 \text{ МВт/м}^2.$$

Для того, чтобы определить необходимую для отвода тепла скорость теплоносителя, нужно узнать площадь сечения прохода теплоносителя, которая приходится на один твэл, плотность теплоносителя и разность теплосодержания теплоносителя на выходе.

Площадь сечения твэла:

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

Площадь сечения прохода теплоносителя, которая приходится на один ТВЭЛ:

$$S = S_{\text{яч}} - S_{\text{ТВЭЛ}} = 1,408 - 0,65 = 0,757 \text{ см}^2.$$

Плотность теплоносителя  $\gamma$  составляет  $0,781 \text{ г/см}^3$  при температуре  $270 \text{ }^\circ\text{C}$  и давлении  $16 \text{ МПа}$ , а теплоемкость  $C_p$  равна  $1,0014 \text{ ккал/(кг}\cdot^\circ\text{C)}$ .

Разность теплосодержания теплоносителя на выходе:

$$\Delta i = C_p (t_{\text{вых}} - t_{\text{вх}}) = 1,0014 \cdot (280 - 260) = 20,03 \text{ ккал/кг}.$$

Скорость теплоносителя, необходимая для отвода тепла:

$$v = \frac{g_{\text{max}} \cdot \Pi_0 \cdot H_{\text{а.з.}}}{3,6 \cdot K_z \cdot \gamma \cdot \Delta i \cdot S} = \frac{1,528 \cdot 2,859 \cdot 2,70}{3,6 \cdot 1,5 \cdot 0,781 \cdot 20,03 \cdot 0,757} = 3,70 \text{ м/с}.$$

Минимальная скорость теплоносителя, необходимая для отвода тепла, составляет  $3,70 \text{ м/с}$  и соответствует установленному пределу в  $10 \text{ м/с}$ .

### 3 Ядерно-физические характеристики «холодного» реактора

Нейтронно-физические характеристики рассчитываются для каждой зоны ячейки реактора отдельно, так как каждая из них обладает различными ядерными свойствами ввиду использования материалов с разными свойствами взаимодействия с нейтронами. Температура всех элементов реактора принимается равной  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ .

#### 3.1 Ядерные концентрации материалов

Ядерная концентрация рассчитывается для каждого из элементов активной зоны рассчитывается по формуле:

$$N_i = \frac{0,6023 \cdot \gamma_i}{A_i} \cdot 10^{24}, \text{ ядер/см}^3, \quad (8)$$

где  $\gamma_i$  – весовая концентрация  $i$ -го элемента,  $\text{г/см}^3$ ;

$A_i$  – атомный вес или молярная масса  $i$ -го элемента,  $\text{г/моль}$ .

Топливо – двуокись урана  $\text{UO}_2$  с обогащением  $2,3 \%$  по  $\text{U}^{235}$  и плотностью  $10,5 \text{ г/см}^3$ . Следовательно, для начала нужно рассчитать концентрацию молекул в топливе:

$$N_{\text{UO}_2} = \frac{0,6023 \cdot \gamma_{\text{UO}_2}}{A_{\text{UO}_2}} \cdot 10^{24} = \frac{0,6023 \cdot 10,5}{270} \cdot 10^{24} = 2,342 \cdot 10^{22} \text{ молекул/см}^3.$$

После этого можно определить ядерные концентрации отдельных элементов в топливе. Для того, чтобы узнать концентрации отдельных изотопов урана, необходимо воспользоваться формулами:

$$N_5 = N_{\text{UO}_2} \frac{C_5}{100}; N_8 = N_{\text{UO}_2} \left(1 - \frac{C_5}{100}\right), \quad (9)$$

где  $C_5$  – обогащение топлива по  $\text{U}^{235}$ , %.

$$N_5 = 2,342 \cdot 10^{22} \cdot \frac{2,3}{100} = 5,387 \cdot 10^{20} \text{ ядер/см}^3;$$

$$N_8 = 2,342 \cdot 10^{22} \left(1 - \frac{2,3}{100}\right) = 2,288 \cdot 10^{22} \text{ ядер/см}^3.$$

Так как в молекуле  $\text{UO}_2$  находятся два атома кислорода, то:

$$N_{\text{O(топл.)}} = 2 \cdot N_{\text{UO}_2} = 2 \cdot 2,342 \cdot 10^{22} = 4,685 \cdot 10^{22} \text{ ядер/см}^3.$$

Теплоносителем является вода  $\text{H}_2\text{O}$ , тогда:

$$N_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{0,6023 \cdot \gamma_{\text{H}_2\text{O}}}{A_{\text{H}_2\text{O}}} \cdot 10^{24} = \frac{0,6023 \cdot 1}{18} \cdot 10^{24} = 3,346 \cdot 10^{22} \text{ молекул/см}^3;$$

$$N_{\text{H}} = 2 \cdot N_{\text{H}_2\text{O}} = 2 \cdot 3,346 \cdot 10^{22} = 6,692 \cdot 10^{22} \text{ ядер/см}^3;$$

$$N_{\text{O(тн.)}} = 1 \cdot N_{\text{H}_2\text{O}} = 1 \cdot 3,346 \cdot 10^{22} = 3,346 \cdot 10^{22} \text{ ядер/см}^3.$$

Оболочка твэла изготовлена из стали 1X18H9T, химический состав которой представлен в таблице 2.

Таблица 2 – Химический состав стали 1X18H9T [4]

Название элемента	Символ	Атомный вес, г/моль	Содержание, %
Углерод	C	12	0,1
Хром	Cr	52	18
Никель	Ni	59	9
Титан	Ti	48	1
Марганец	Mn	55	≤ 2,0
Молибден	Mo	96	≤ 0,5
Кремний	Si	28	≤ 0,4
Медь	Cu	64	≤ 0,3

Продолжение таблицы 2

Фосфор	P	31	$\leq 0,035$
Сера	S	32	$\leq 0,02$
Железо	Fe	56	$\approx 70$

В рамках данной работы можно пренебречь наличием в стали примесей в виде марганца, молибдена, кремния, меди, фосфора и серы. Содержание углерода в стали мало и им также можно пренебречь. В таком случае содержание железа следует принять равным 72 %, что в сумме с содержанием в стали добавок и даст 100 %.

При изготовлении топливных таблеток в их центре проделывают отверстие, а между таблетками и оболочкой твэла имеется зазор. В эти полости при изготовлении твэлов закачивается гелий, но так как он там находится в виде газа и, следовательно, имеет крайне малую плотность (0,00017846 г/см<sup>3</sup>), его можно не учитывать при дальнейших расчётах.

Ядерные концентрации элементов, из которых состоит сталь, рассчитываются как:

$$N_j = \frac{0,6023 \cdot \gamma_{st} \cdot C_j}{A_j} \cdot 10^{24}, \quad (10)$$

где  $\gamma_{st}$  – плотность стали 1X18Н9Т, г/см<sup>3</sup>;

$C_j$  – содержание  $j$ -го элемента в стали;

$A_j$  – атомный вес  $j$ -го элемента, г/моль.

Плотность стали 1X18Н9Т при 20 °С составляет 7,9 г/см<sup>3</sup>. Ядерные концентрации элементов материала оболочки твэла:

$$N_{Cr} = \frac{0,6023 \cdot 7,9 \cdot C_{Cr}}{A_{Cr}} \cdot 10^{24} = \frac{0,6023 \cdot 7,9 \cdot 0,18}{52} \cdot 10^{24} = 1,647 \cdot 10^{22} \text{ ядер/см}^3;$$

$$N_{Ni} = \frac{0,6023 \cdot 7,9 \cdot C_{Ni}}{A_{Ni}} \cdot 10^{24} = \frac{0,6023 \cdot 7,9 \cdot 0,09}{59} \cdot 10^{24} = 7,258 \cdot 10^{21} \text{ ядер/см}^3;$$

$$N_{Ti} = \frac{0,6023 \cdot 7,9 \cdot C_{Ti}}{A_{Ti}} \cdot 10^{24} = \frac{0,6023 \cdot 7,9 \cdot 0,01}{48} \cdot 10^{24} = 9,913 \cdot 10^{20} \text{ ядер/см}^3;$$

$$N_{Fe} = \frac{0,6023 \cdot 7,9 \cdot C_{Fe}}{A_{Fe}} \cdot 10^{24} = \frac{0,6023 \cdot 7,9 \cdot 0,72}{56} \cdot 10^{24} = 6,118 \cdot 10^{22} \text{ ядер/см}^3.$$

### 3.2 Гомогенизация

Гетерогенная элементарная ячейка реактора типа ВВЭР имеет шестиугольное поперечное сечение. Внутри она подразделяется на несколько зон:

1. Центральное отверстие в таблетке, заполненное гелием
2. Топливная таблетка из диоксида урана
3. Зазор между топливной таблеткой и оболочкой твэла
4. Оболочка твэла
5. Вода в роли теплоносителя и замедлителя.

Схема элементарной ячейки в упрощенном виде с нумерацией зон представлена на рисунке 2.

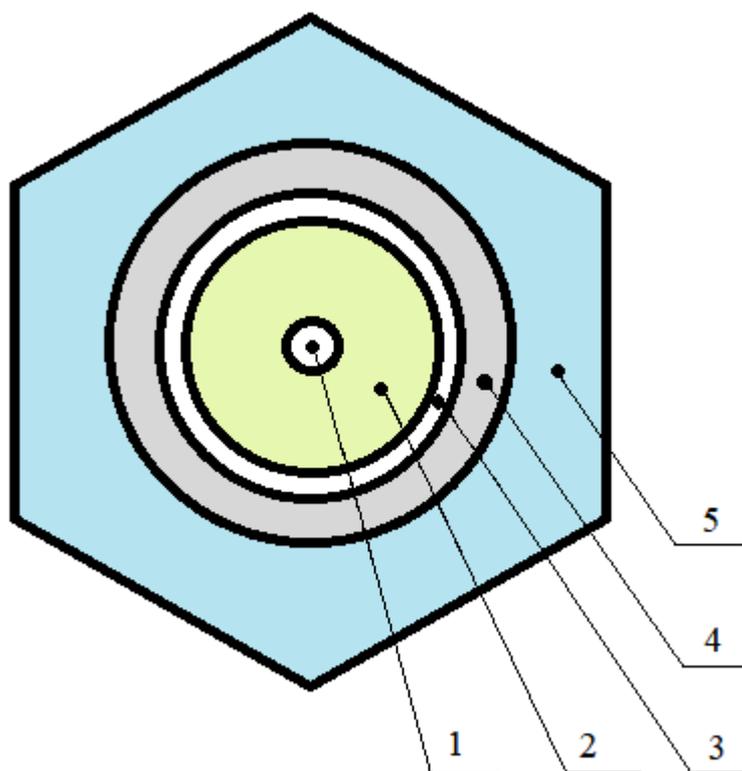


Рисунок 2 – Гетерогенная элементарная ячейка

Для того, чтобы упростить дальнейшие расчеты, используется метод гомогенизации ячейки. Принятые геометрические размеры элементов ячейки представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Геометрические размеры элементов ячейки [5]

Параметр	Обозначение	Значение
Внешний радиус твэла	$R_{\text{ТВЭЛ}}$	0,455 см
Внутренний радиус твэла	$r_{\text{ТВЭЛ}}$	0,07 см
Внутренний радиус оболочки	$r_{\text{об}}$	0,39 см
Внешний радиус топлива	$R_{\text{ТОПЛ}}$	0,3765 см
Площадь сечения твэла	$S_{\text{ТВЭЛ}}$	0,65 см <sup>2</sup>
Площадь сечения теплоносителя	$S_{\text{ТН}}$	0,758 см <sup>2</sup>
Площадь сечения ячейки	$S_{\text{яч}}$	1,408 см <sup>2</sup>

### 3.2.1 Гомогенизация первого вида

В первом варианте гомогенизации элементарная ячейка представляется в виде однородной гомогенизированной смеси, как показано на рисунке 3.

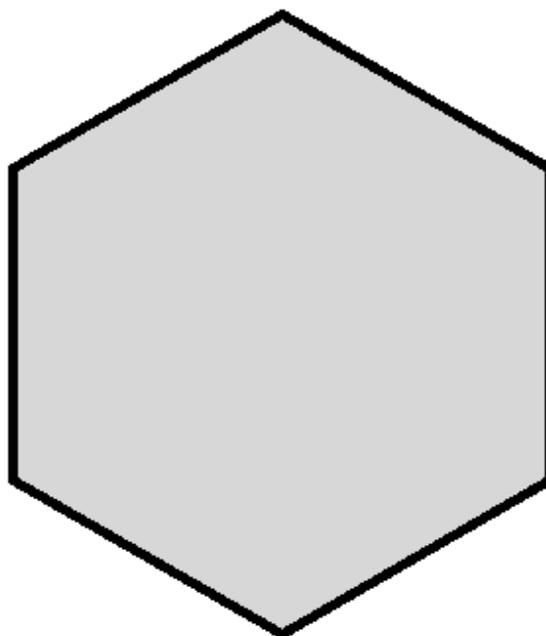


Рисунок 3 – Ячейка после проведения гомогенизации первого вида

Тогда ядерные концентрации гомогенизированных элементов можно найти как:

$$N_i(r1) = \frac{N_i \cdot S_i}{S_{\text{яч}}}, \text{ ядер/см}^3, \quad (11)$$

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

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

Площадь сечения для элементов топливной таблетки:

$$S_{\text{топл}} = \pi \cdot (R_{\text{топл}}^2 - r_{\text{ТВЭЛ}}^2) = \pi \cdot (0,3765^2 - 0,07^2) = 0,43 \text{ см}^2.$$

Площадь сечения для элементов оболочки ТВЭЛА:

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

Ядерные концентрации гомогенизированных элементов, рассчитанные по формуле (11):

$$N_5(\text{г1}) = \frac{N_5 \cdot S_{\text{топл}}}{S_{\text{яч}}} = \frac{5,387 \cdot 10^{20} \cdot 0,43}{1,408} = 1,645 \cdot 10^{20} \text{ ядер/см}^3;$$

$$N_8(\text{г1}) = \frac{N_8 \cdot S_{\text{топл}}}{S_{\text{яч}}} = \frac{2,288 \cdot 10^{22} \cdot 0,43}{1,408} = 6,988 \cdot 10^{21} \text{ ядер/см}^3;$$

$$N_{\text{O(топл.)}}(\text{г1}) = \frac{N_{\text{O(топл.)}} \cdot S_{\text{топл}}}{S_{\text{яч}}} = \frac{4,685 \cdot 10^{22} \cdot 0,43}{1,408} = 1,431 \cdot 10^{22} \text{ ядер/см}^3;$$

$$N_{\text{H}}(\text{г1}) = \frac{N_{\text{H}} \cdot S_{\text{тн}}}{S_{\text{яч}}} = \frac{6,692 \cdot 10^{22} \cdot 0,758}{1,408} = 3,603 \cdot 10^{22} \text{ ядер/см}^3;$$

$$N_{\text{O(тн.)}}(\text{г1}) = \frac{N_{\text{O(тн.)}} \cdot S_{\text{тн}}}{S_{\text{яч}}} = \frac{3,346 \cdot 10^{22} \cdot 0,758}{1,408} = 1,802 \cdot 10^{22} \text{ ядер/см}^3;$$

$$N_{\text{Cr}}(\text{г1}) = \frac{N_{\text{Cr}} \cdot S_{\text{об}}}{S_{\text{яч}}} = \frac{1,647 \cdot 10^{22} \cdot 0,17}{1,408} = 2,019 \cdot 10^{21} \text{ ядер/см}^3;$$

$$N_{\text{Ni}}(\text{г1}) = \frac{N_{\text{Ni}} \cdot S_{\text{об}}}{S_{\text{яч}}} = \frac{7,258 \cdot 10^{21} \cdot 0,17}{1,408} = 8,896 \cdot 10^{20} \text{ ядер/см}^3;$$

$$N_{\text{Ti}}(\text{г1}) = \frac{N_{\text{Ti}} \cdot S_{\text{об}}}{S_{\text{яч}}} = \frac{9,913 \cdot 10^{20} \cdot 0,17}{1,408} = 1,215 \cdot 10^{20} \text{ ядер/см}^3;$$

$$N_{\text{Fe}}(\text{г1}) = \frac{N_{\text{Fe}} \cdot S_{\text{об}}}{S_{\text{яч}}} = \frac{6,118 \cdot 10^{22} \cdot 0,17}{1,408} = 7,498 \cdot 10^{21} \text{ ядер/см}^3.$$

### 3.2.2 Гомогенизация второго вида

Во втором варианте гомогенизации элементарная ячейка разделяется на две гомогенизированные зоны, как представлено на рисунке 4. Фиктивный блок представляет из себя гомогенизированную смесь элементов ТВЭЛА.

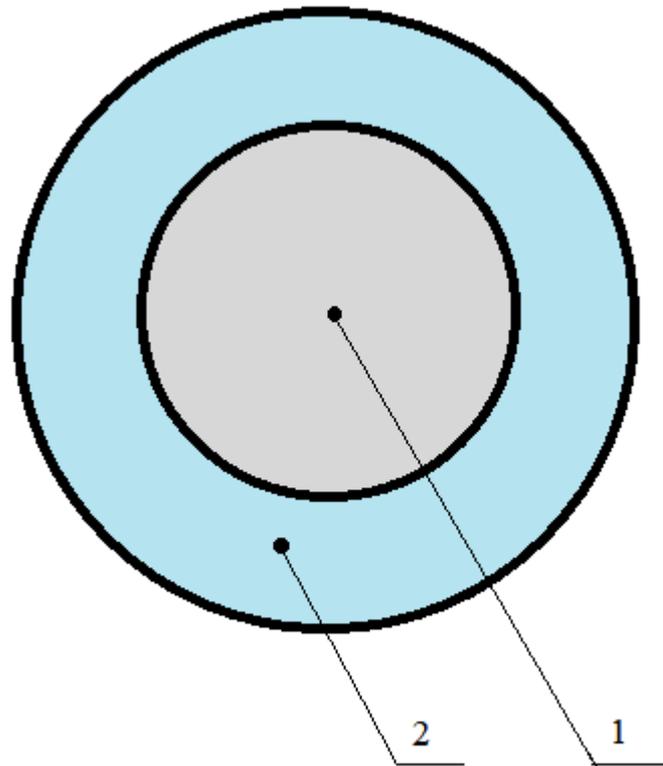


Рисунок 4 – Ячейка после проведения гомогенизации второго вида:

1 – фиктивный блок; 2 – теплоноситель-замедлитель

В таком случае ядерные концентрации элементов теплоносителя не изменяются, так как:

$$N_i(\Gamma 2) = \frac{N_i \cdot S_{\text{тн}}}{S_{\text{тн}}} = N_i, \text{ ядер/см}^3. \quad (12)$$

Тогда, согласно формуле (12):

$$N_{\text{H}}(\Gamma 2) = N_{\text{H}} = 6,692 \cdot 10^{22} \text{ ядер/см}^3;$$

$$N_{\text{O(тн)}}(\Gamma 2) = N_{\text{O(тн)}} = 3,346 \cdot 10^{22} \text{ ядер/см}^3.$$

Ядерные концентраций элементов, входящих в фиктивный блок, рассчитываются как:

$$N_i(\Gamma 2) = \frac{N_i \cdot S_i}{S_{\text{ТВЭЛ}}}, \text{ ядер/см}^3. \quad (13)$$

Тогда, согласно формуле (13):

$$N_5(\Gamma 2) = \frac{N_5 \cdot S_{\text{топл}}}{S_{\text{ТВЭЛ}}} = \frac{5,387 \cdot 10^{20} \cdot 0,43}{0,65} = 3,563 \cdot 10^{20} \text{ ядер/см}^3;$$

$$N_8(\Gamma 2) = \frac{N_8 \cdot S_{\text{топл}}}{S_{\text{ТВЭЛ}}} = \frac{2,288 \cdot 10^{22} \cdot 0,43}{0,65} = 1,514 \cdot 10^{22} \text{ ядер/см}^3;$$

$$N_{\text{O(топл.)}}(\Gamma 2) = \frac{N_{\text{O(топл.)}} \cdot S_{\text{топл}}}{S_{\text{ТВЭЛ}}} = \frac{4,685 \cdot 10^{22} \cdot 0,43}{0,65} = 3,099 \cdot 10^{22} \text{ ядер/см}^3;$$

$$N_{\text{Cr}}(\Gamma 2) = \frac{N_{\text{Cr}} \cdot S_{\text{об}}}{S_{\text{ТВЭЛ}}} = \frac{1,647 \cdot 10^{22} \cdot 0,17}{0,65} = 4,372 \cdot 10^{21} \text{ ядер/см}^3;$$

$$N_{\text{Ni}}(\Gamma 2) = \frac{N_{\text{Ni}} \cdot S_{\text{об}}}{S_{\text{ТВЭЛ}}} = \frac{7,258 \cdot 10^{21} \cdot 0,17}{0,65} = 1,927 \cdot 10^{21} \text{ ядер/см}^3;$$

$$N_{\text{Ti}}(\Gamma 2) = \frac{N_{\text{Ti}} \cdot S_{\text{об}}}{S_{\text{ТВЭЛ}}} = \frac{9,913 \cdot 10^{20} \cdot 0,17}{0,65} = 2,632 \cdot 10^{20} \text{ ядер/см}^3;$$

$$N_{\text{Fe}}(\Gamma 2) = \frac{N_{\text{Fe}} \cdot S_{\text{об}}}{S_{\text{ТВЭЛ}}} = \frac{6,118 \cdot 10^{22} \cdot 0,17}{0,65} = 1,624 \cdot 10^{22} \text{ ядер/см}^3.$$

Гетерогенные и гомогенизированные концентрации всех рассматриваемых элементов представлены в виде таблицы в Приложении А.

### 3.3 Сечения взаимодействий материалов с нейтронами

Так как значения сечений, приведённых в справочниках, относятся к энергии нейтронов, равной 0,0253 эВ, при которой распределение нейтронов происходит по спектру Максвелла наиболее вероятной скорости 2200 м/с, то возникает необходимость в их обработке.

При физико-нейтронных расчётах все поперечные сечения должны быть отнесены к средней скорости нейтронов. Максвелловский спектр тепловых нейтронов постепенно переходит в спектр замедляющихся нейтронов при температуре 293 К и при энергии, примерно равной 0,2 эВ – «энергии сшивки».

В реальных средах распределение тепловых нейтронов не совпадает в точности с распределением Максвелла. Так как имеет место быть поглощение тепловых нейтронов, то спектр сдвинут в область больших энергий.

Для удобства расчётов в теории реакторов принято, что тепловые нейтроны распределены по спектру Максвелла, но имеют более высокую

эффективную температуру, которая превышает температуру замедлителя. Это температура нейтронного газа.

Для того, чтобы определить поперечные сечения деления и поглощения, отнесенные к средней скорости тепловых нейтронов, необходимо воспользоваться формулами:

$$\bar{\sigma}_a = \sigma_{a_0} \cdot 0,884 f_a \sqrt{\frac{293}{T_{\text{н.г.}}}}, \text{ б;} \quad (14)$$

$$\bar{\sigma}_f = 0,884 \sigma_{f_0} f_f \sqrt{\frac{293}{T_{\text{н.г.}}}}, \text{ б,} \quad (15)$$

где  $\sigma_{a_0}$ ,  $\sigma_{f_0}$  – справочные значения сечений, б;

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

$T_{\text{н.г.}}$  – температура нейтронного газа.

Справочное значение сечения поглощения определяется как:

$$\sigma_{a_0} = \sigma_{f_0} + \sigma_c, \text{ б.} \quad (16)$$

При расчёте холодного реактора температуру нейтронного газа можно принимать в пределах от 350 до 400 К. Пусть  $T_{\text{н.г.}} = 400$  К, тогда для делящихся нуклидов  $f_a = f_f = 0,96$ , а для неделящихся нуклидов  $f_a = 1$ .

Микроскопические сечения рассеяния почти не зависят от энергии тепловых нейтронов, следовательно, в данном случае можно напрямую воспользоваться данными из справочника.

Микроскопическое транспортное сечение вычисляется по формуле:

$$\sigma_{tr} = \sigma_e(1 - \mu_e) + \sigma_c + \bar{\sigma}_f + \sigma_{in}, \text{ б.} \quad (17)$$

Макроскопические поперечные сечения рассчитываются по формуле:

$$\Sigma_i^j = \sigma_i N_j, \text{ см}^{-1}. \quad (18)$$

Табличные значения микроскопических сечений взаимодействия для всех рассматриваемых элементов представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Микроскопические сечения взаимодействия [6]

Элемент	$\sigma_f, б$	$\sigma_c, б$	$\sigma_{a_0}, б$	$\sigma_{in}, б$	$\sigma_e, б$	$\mu_e$
U <sup>235</sup>	582	101	683	0	15	0
U <sup>238</sup>	0	2,71	2,71	0	9	0
O	0	0	0	0	3,75	0,04
H	0	0,332	0,332	0	20,3	0,667
Cr	0	3,1	3,1	0	4,2	0,01
Ni	0	4,6	4,6	0	17	0,01
Ti	0	5,8	5,8	0	4,2	0,01
Fe	0	2,53	2,53	0	11,4	0,01

Для всех рассматриваемых элементов  $\sigma_{in} = 0$ . Следовательно, можно принять микроскопическое сечение рассеяния  $\sigma_s = \sigma_e$ , тогда для расчёта макроскопического сечения рассеяния  $\Sigma_s$  будет использоваться только  $\sigma_e$ .

Замедляющая способность вещества вычисляется по формуле:

$$\xi \Sigma_s^i = \sum_{i=1}^m \xi_i N_i \sigma_s^i = \sum_{i=1}^m \xi_i \Sigma_s^i, \text{ см}^{-1}, \quad (19)$$

где  $\xi_i$  – логарифмический декремент, равный:

$$\xi_i = 1 + \frac{(A_i - 1)^2}{2 \cdot A_i} \cdot \ln \left( \frac{A_i - 1}{A_i + 1} \right). \quad (20)$$

В случае гомогенных смесей и гетерогенных сред, рассматриваемых как гомогенные, макроскопические сечения рассчитываются по общей формуле:

$$\Sigma_j^i = \sum_{i=1}^m N_i(\Gamma) \sigma_i, \text{ см}^{-1}. \quad (21)$$

Величина логарифмического декремента для смеси веществ или сплава определяется как:

$$\xi_i = \frac{\sum_{i=1}^m \xi_i N_i \sigma_s^i}{\sum_{i=1}^m N_i \sigma_s^i}. \quad (22)$$

В качестве примера далее представлен расчёт сечений для U<sup>235</sup>:

$$\bar{\sigma}_a^5 = 683 \cdot 0,884 \cdot 0,96 \sqrt{\frac{293}{400}} = 496,076 \text{ б};$$

$$\bar{\sigma}_f^5 = 0,884 \cdot 582 \cdot 0,96 \sqrt{\frac{293}{400}} = 422,718 \text{ б};$$

$$\sigma_{rr}^5 = 15 \cdot (1 - 0) + 101 + 422,718 + 0 = 538,718 \text{ б};$$

$$\Sigma_a^5 = 496,076 \cdot 10^{-24} \cdot 5,387 \cdot 10^{20} = 0,267 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_f^5 = 422,718 \cdot 10^{-24} \cdot 5,387 \cdot 10^{20} = 0,228 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_c^5 = 101 \cdot 10^{-24} \cdot 5,387 \cdot 10^{20} = 0,054 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_s^5 = 15 \cdot 10^{-24} \cdot 5,387 \cdot 10^{20} = 0,008 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_{rr}^5 = 538,718 \cdot 10^{-24} \cdot 5,387 \cdot 10^{20} = 0,290 \text{ см}^{-1};$$

$$\xi_{s^5} = 1 + \frac{(235 - 1)^2}{2 \cdot 235} \cdot \ln\left(\frac{235 - 1}{235 + 1}\right) = 0,0085;$$

$$\xi \Sigma_s^5 = 0,0085 \cdot 0,008 = 0,00007 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_a^5(\Gamma 1) = 496,076 \cdot 10^{-24} \cdot 1,645 \cdot 10^{20} = 0,082 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_f^5(\Gamma 1) = 422,718 \cdot 10^{-24} \cdot 1,645 \cdot 10^{20} = 0,070 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_c^5(\Gamma 1) = 101 \cdot 10^{-24} \cdot 1,645 \cdot 10^{20} = 0,017 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_s^5(\Gamma 1) = 15 \cdot 10^{-24} \cdot 1,645 \cdot 10^{20} = 0,002 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_{rr}^5(\Gamma 1) = 538,718 \cdot 10^{-24} \cdot 1,645 \cdot 10^{20} = 0,089 \text{ см}^{-1};$$

$$\xi \Sigma_s^5(\Gamma 1) = 0,0085 \cdot 0,002 = 0,00002 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_a^5(\Gamma 2) = 496,076 \cdot 10^{-24} \cdot 3,563 \cdot 10^{20} = 0,177 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_f^5(\Gamma 2) = 422,718 \cdot 10^{-24} \cdot 3,563 \cdot 10^{20} = 0,151 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_c^5(\Gamma 2) = 101 \cdot 10^{-24} \cdot 3,563 \cdot 10^{20} = 0,036 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_s^5(\Gamma 2) = 15 \cdot 10^{-24} \cdot 3,563 \cdot 10^{20} = 0,005 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_{rr}^5(\Gamma 2) = 538,718 \cdot 10^{-24} \cdot 3,563 \cdot 10^{20} = 0,192 \text{ см}^{-1};$$

$$\xi \Sigma_s^5(\Gamma 2) = 0,0085 \cdot 0,005 = 0,00005 \text{ см}^{-1};$$

Результаты расчётов микроскопических и макроскопических сечений взаимодействия для всех рассматриваемых элементов представлены в Приложении Б.

## 4 Коэффициент размножения нейтронов

Коэффициент размножения нейтронов показывает отношение нейтронов последующего поколения к числу нейтронов предшествующего поколения во всем объеме активной зоны ядерного реактора.

Для тепловых реакторов в бесконечной среде данный коэффициент вычисляется при помощи формулы четырех сомножителей:

$$k_{\infty} = \mu \cdot \varphi \cdot \theta \cdot \eta, \quad (23)$$

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

$\varphi$  – вероятность избежать резонансного захвата;

$\theta$  – коэффициент использования тепловых нейтронов;

$\eta$  – выход нейтронов на одно поглощение.

### 4.1 Коэффициент размножения на быстрых нейтронах

Коэффициент размножения на быстрых нейтронах в гетерогенных реакторах зависит от геометрии и расположения топливного блока и от диффузионных свойств топлива. В случае стержневых и трубчатых ТВЭЛов для расчёта данного коэффициента используется формула:

$$\mu = \mu_{\text{блок}} + \frac{\mu_{\infty} - \mu_{\text{блок}}}{1 + 2,3 \frac{N_{\text{H}}}{N_{\text{g}}}}, \quad (24)$$

где  $\mu_{\infty} = 1,19$  – коэффициент размножения на быстрых нейтронах в бесконечной среде;

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

$\frac{N_{\text{H}}}{N_{\text{g}}}$  – уран-водное отношение в активной зоне.

Уран-водное отношение определяется как:

$$\frac{N_{\text{H}}}{N_{\text{g}}} = 2 \cdot \frac{S_{\text{тн}} \cdot H_{\text{а.з.}} \cdot \gamma_{\text{тн}} \cdot A_8}{S_{\text{топл}} \cdot H_{\text{а.з.}} \cdot \gamma_{\text{UO}_2} \cdot A_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \left(1 - \frac{C_5}{100}\right)}, \quad (25)$$

где  $\gamma_{\text{тн}}$  – плотность теплоносителя при рабочих параметрах, г/см<sup>3</sup>.

$$\frac{N_{\text{н}}}{N_8} = 2 \cdot \frac{0,758 \cdot 2,7 \cdot 1 \cdot 238}{0,3765 \cdot 2,7 \cdot 10,5 \cdot 18 \cdot \left(1 - \frac{2,3}{100}\right)} = 4,545.$$

Коэффициент размножения на быстрых нейтронах для одиночного блока, помещенного в разреженную решётку, вычисляется по формуле:

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

где  $P$  – вероятность столкновения быстрого нейтрона с ядром  $U^{238}$ .

Пористость блока по  $U^{238}$  ( $\mu_1$ ) определяется по формуле:

$$\mu_1 = \frac{N_8}{N_{8(\text{прир.})}}, \quad (27)$$

где  $N_8$  – число ядер  $U^{238}$  в 1 см<sup>3</sup> блока;

$N_{8(\text{прир.})}$  – число ядер  $U^{238}$  в 1 см<sup>3</sup> природного урана.

$$\mu_1 = \frac{2,288 \cdot 10^{22}}{19,05 \cdot 0,9927 \cdot 6,022 \cdot 10^{23} / 238} = 0,478.$$

Значение  $P$  зависит от геометрии и формы топливного блока и определяется по графику, представленному на рисунке 5.

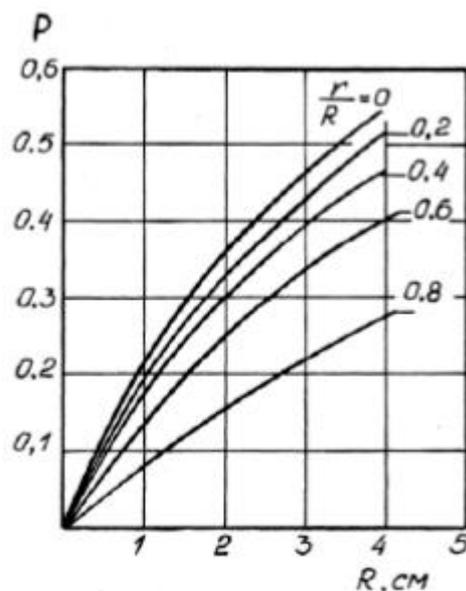


Рисунок 5 – График вероятности столкновения быстрого нейтрона с ядром  $U^{238}$

Так как  $R_{\text{топл}} = 0,3765$  см, то, согласно графику на рисунке 5, можно принять значение  $P = 0,1$ . Тогда:

$$\mu_{\text{блок}} = 1 + \frac{0,092 \cdot 0,1}{1 - 0,52 \cdot 0,1} \cdot 0,478 = 1,005;$$

$$\mu = 1,005 + \frac{1,19 - 1,005}{1 + 2,3 \cdot 4,545} = 1,021.$$

## 4.2 Вероятность избежать резонансного захвата

В случае ячейки со стрержневыми блоками вероятность избежать резонансного захвата вычисляется по формуле:

$$\varphi = \exp\left(-\frac{k_T \cdot R_{\text{топл}} \cdot \sqrt{R_{\text{топл}} \cdot \mu_1} + 0,73 \cdot R_{\text{топл}}^2 \cdot \mu_1}{\xi \Sigma_s^{\text{тн}} \cdot S_{\text{тн}} + \xi \Sigma_s^{\text{фб}} \cdot S_{\text{твэл}}}\right), \quad (28)$$

где  $\xi \Sigma_s^{\text{тн}}$  – замедляющая способность замедлителя-теплоносителя ( $\xi \Sigma_s^{\text{тн}} = 1,37334 \text{ см}^{-1}$ );

$\xi \Sigma_s^{\text{фб}}$  – замедляющая способность фиктивного блока ( $\xi \Sigma_s^{\text{фб}} = 0,02350 \text{ см}^{-1}$ ).

Температурный коэффициент  $k_T$  рассчитывается по формуле:

$$k_T = 0,775 \cdot (1 + 17,5 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{T_{\text{топл}}}), \quad (29)$$

где  $T_{\text{топл}}$  – температура топлива.

Так как  $T_{\text{топл}} = 293 \text{ К}$ , то:

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

$$\varphi = \exp\left(-\frac{1,007 \cdot 0,3765 \cdot \sqrt{0,3765 \cdot 0,478} + 0,73 \cdot 0,3765^2 \cdot 0,478}{1,37334 \cdot 0,758 + 0,02350 \cdot 0,65}\right) = 0,819.$$

## 4.3 Коэффициент использования тепловых нейтронов

Расчёт коэффициента использования тепловых нейтронов производится в два этапа. Сперва необходимо определить отношение числа тепловых нейтронов, поглощенных в фиктивном блоке, к общему числу поглощенных тепловых нейтронов:

$$\frac{1}{\theta'_{\text{фб}}} = 1 + F \frac{S_{\text{тн}} \cdot \Sigma_a^{\text{тн}}}{S_{\text{твэл}} \cdot \Sigma_a^{\text{фб}}} + (E - 1) \quad (30)$$

Коэффициент экранирования для цилиндрического уранового стержня:

$$F = \frac{1}{2} \frac{R_{\text{фб}} \cdot I_0 \left( \frac{R_{\text{фб}}}{L_{\text{фб}}} \right)}{L_{\text{фб}} \cdot I_1 \left( \frac{R_{\text{фб}}}{L_{\text{фб}}} \right)}, \quad (31)$$

где  $R_{\text{фб}} = R_{\text{твэл}} = 0,455$  см – радиус фиктивного блока.

Длина диффузии в фиктивном блоке:

$$L_{\text{фб}} = \sqrt{\frac{1}{3 \cdot \Sigma_a^{\text{фб}} \cdot \Sigma_{tr}^{\text{фб}}}} = \sqrt{\frac{1}{3 \cdot 0,2570 \cdot 0,7808}} = 1,289 \text{ см.} \quad (32)$$

Фактор избыточного поглощения нейтронов в замедлителе:

$$(E - 1) = 0,5 \left( \frac{R_{\text{тн}}}{L_{\text{тн}}} \right)^2 \cdot \left( \ln \left( \frac{R_{\text{тн}}}{R_{\text{фб}}} \right) - 0,75 \right), \quad (33)$$

где  $R_{\text{тн}}$  – радиус, занимаемый теплоносителем-замедлителем.

$$R_{\text{тн}} = \sqrt{\frac{S_{\text{яч}}}{\pi}} = \sqrt{\frac{1,408}{\pi}} = 0,67 \text{ см.} \quad (34)$$

Длина диффузии в теплоносителе-замедлителе:

$$L_{\text{тн}} = \sqrt{\frac{1}{3 \cdot \Sigma_a^{\text{тн}} \cdot \Sigma_{tr}^{\text{тн}}}} = \sqrt{\frac{1}{3 \cdot 0,0168 \cdot 0,5951}} = 5,773 \text{ см.} \quad (35)$$

Далее рассчитывается коэффициент использования тепловых нейтронов:

$$\theta = \theta'_{\text{фб}} \cdot \theta_0, \quad (36)$$

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

$$\theta_0 = \frac{\Sigma_a^{\text{топл}}(\Gamma 2)}{\Sigma_a^{\text{фб}}}. \quad (37)$$

$$(E - 1) = 0,5 \left( \frac{0,67}{5,773} \right)^2 \cdot \left( \ln \left( \frac{0,67}{0,455} \right) - 0,75 \right) = -0,00245;$$

$$F = \frac{1}{2} \frac{0,455 \cdot I_0 \left( \frac{0,455}{1,289} \right)}{1,289 \cdot I_1 \left( \frac{0,455}{1,289} \right)} = 1,007;$$

$$\frac{1}{\theta'_{\text{фб}}} = 1 + 1,007 \frac{0,758 \cdot 0,0168}{0,65 \cdot 0,2570} = 0,00245;$$

$$\theta'_{\text{фб}} = 0,931;$$

$$\theta_0 = \frac{\Sigma_a^{\text{топл}}(\Gamma 2)}{\Sigma_a^{\text{фб}}} = \frac{0,2078}{0,2570} = 0,809.$$

Подставив полученные значения  $\theta'_{\text{фб}}$  и  $\theta_0$  в формулу (36), можно получить коэффициент использования тепловых нейтронов:

$$\theta = 0,931 \cdot 0,809 = 0,753.$$

#### 4.4 Выход нейтронов на одно поглощение

Выход нейтронов на одно поглощение показывает число вторичных нейтронов, которые приходятся на тепловой нейтрон, вызвавший деление. Делящимся материалом в топливе является  $U^{235}$ , поэтому:

$$\eta = \nu_f \cdot \frac{\Sigma_f^5}{\Sigma_a^5}, \quad (38)$$

где  $\nu_f$  – среднее число нейтронов, получаемых в одном акте деления.

$$\eta = 2,42 \cdot \frac{0,070}{0,082} = 2,062.$$

Перемножив полученные значения коэффициентов согласно формуле (23), можно получить коэффициент размножения нейтронов для бесконечной среды:

$$k_{\infty} = 1,021 \cdot 0,819 \cdot 0,753 \cdot 2,062 = 1,298.$$

### 5 Оптимизация параметров ячейки

В целях проведения оптимизации необходимо подобрать параметры ячейки, при которых коэффициент размножения нейтронов для бесконечной

среды будет максимальным. Для этого построены график зависимости  $k_{\infty}$  от шага расстановки твэлов и график зависимости  $k_{\infty}$  от внешнего радиуса топливной таблетки, представленные на рисунках 6 и 7 соответственно.

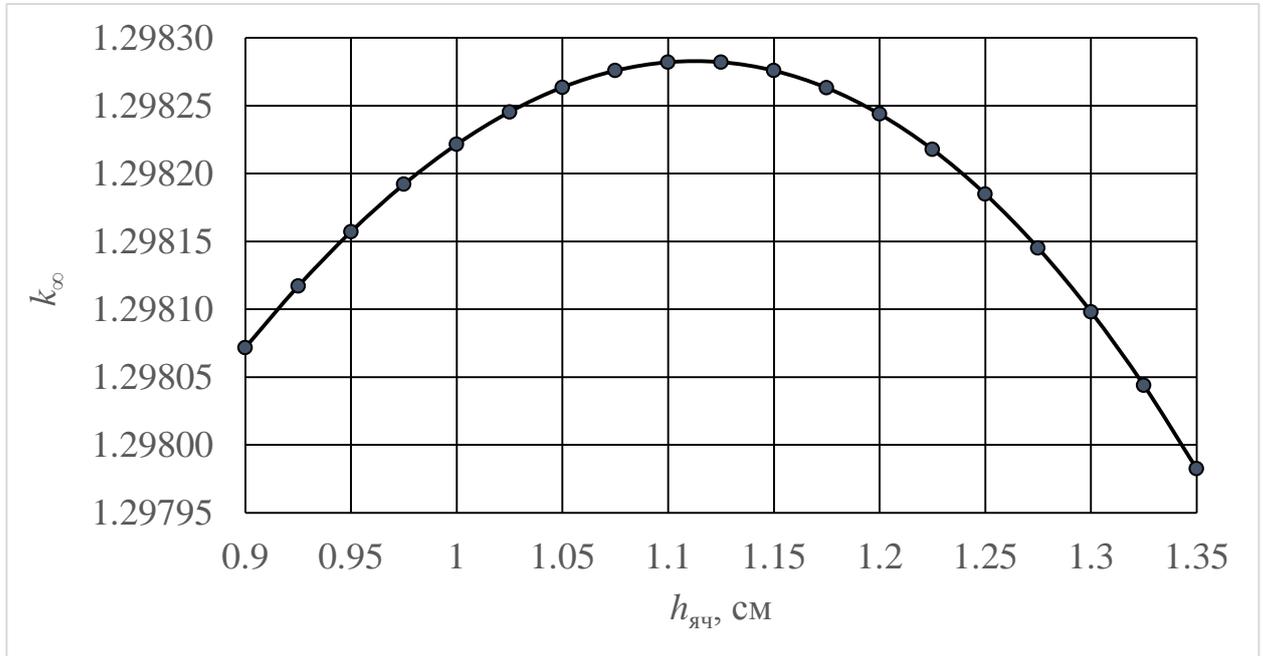


Рисунок 6 – График зависимости  $k_{\infty}$  от шага расстановки твэлов

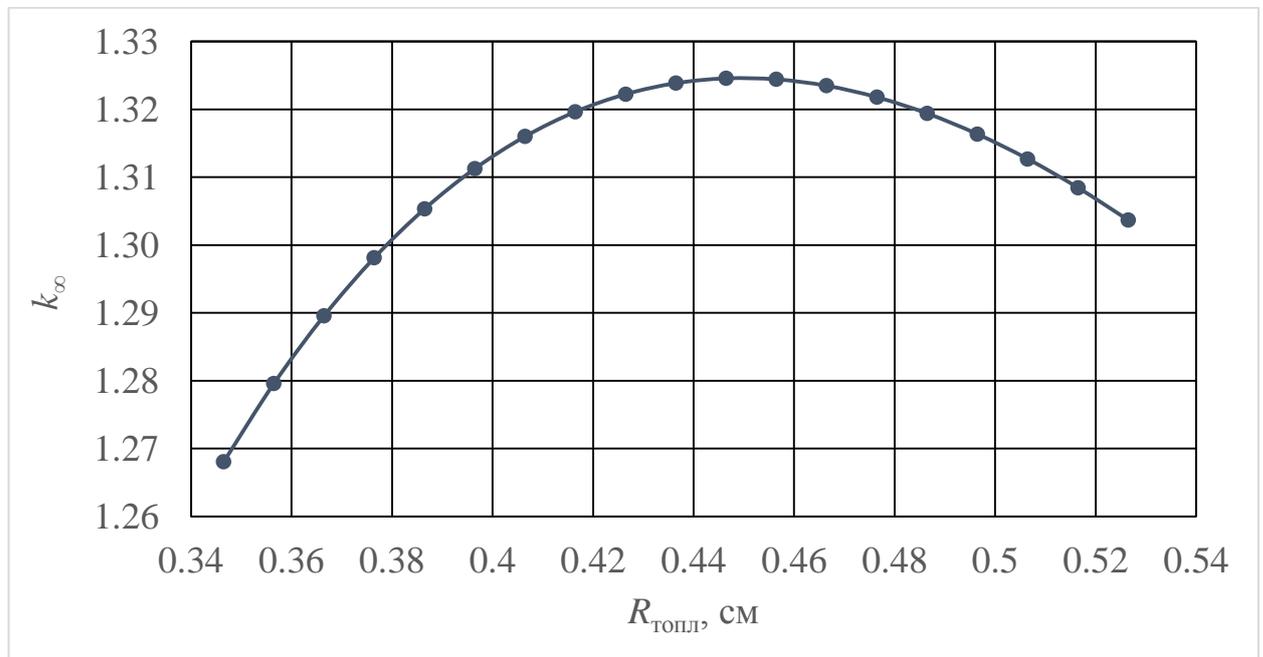


Рисунок 7 – График зависимости  $k_{\infty}$  от внешнего радиуса топливной таблетки

Начальное увеличение  $k_{\infty}$ , которое можно наблюдать на рисунке 6, связано с тем, что вероятность избежать резонансного захвата в «редких» решётках выше, чем в «тесных». Объем замедлителя в них больше,

нейтроны могут замедлиться до слабых резонансных или тепловых уровней, на которых вероятность захвата меньше. Дальнейшее уменьшение  $k_\infty$  связано с проявлением внешнего блок-эффекта. Также в «редких» решетках значение коэффициента размножения быстрых нейтронов меньше, чем в «тесных», так как быстрые нейтроны замедляются до подпороговых и, следовательно, не могут инициировать деление  $U^{238}$ .

Проявление внутренних и внешних блок-эффектов, сильно влияющих на коэффициент использования тепловых нейтронов, можно наблюдать на рисунке 7. Уменьшение  $k_\infty$  происходит из-за усиления внутреннего блок-эффекта, так как увеличивается значение плотности потока тепловых нейтронов на поверхности топливного блока.

В результате проведения оптимизации параметров ячейки найдено наиболее оптимальное значение  $k_\infty = 1,325$ , при котором  $h_{яч} = 1,125$  см,  $R_{топл} = 0,4465$  см,  $v = 4,89$  м/с. Полученная скорость прокачки теплоносителя соответствует установленному пределу в 10 м/с.

## 6 Эффективный коэффициент размножения

Эффективный коэффициент размножения нейтронов определяется по формуле:

$$k_{эф} = \frac{k_\infty \cdot \exp(-B^2 \cdot \tau_p^2)}{1 + B^2 \cdot L_p^2}, \quad (39)$$

где  $B^2$  – геометрический параметр;

$\tau_p^2$  – возраст нейтронов в решётке;

$L_p^2$  – квадрат длины диффузии в решётке.

Квадрат длины диффузии в решётке вычисляется как:

$$L_p^2 = L_{тн}^2 \cdot (1 - \theta) + L_{фб}^2 \cdot \theta, \text{ см}^2. \quad (40)$$

Для определения возраста нейтронов в решётке используется приближённая формула:

$$\tau_p^2 = \tau_{тн} \left( \frac{S_{яч}}{S_{тн}} \right)^{0,5}, \text{ см}^2, \quad (41)$$

где  $\tau_{тн} = 27,3$  см – возраст нейтронов в теплоносителе-замедлителе (воде).

Геометрический параметр в случае реактора цилиндрической формы:

$$B^2 = \left( \frac{\pi}{H_э} \right)^2 + \left( \frac{2,405}{R_э} \right)^2, \text{ см}^{-2}, \quad (42)$$

где  $H_э$  и  $R_э$  – эквивалентные высота и радиус активной зоны реактора, см.

Так как в реакторе типа ВВЭР используется отражатель, то необходимо учитывать эффективную добавку за счёт отражателя:

$$H_э = H_{а.з.} + 2\delta, \text{ см}; \quad (43)$$

$$R_э = \frac{D_{а.з.}}{2} + \delta, \text{ см}, \quad (44)$$

где  $\delta$  – эффективная добавка за счёт отражателя, см.

Реактор водо-водяной, отражатель водный, поэтому:

$$\delta = 7,2 + 0,1 \cdot (M^2 - 40), \text{ см}, \quad (45)$$

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

$$M^2 = \tau_{тн} + L_{тн}^2, \text{ см}^2. \quad (46)$$

Тогда расчёт эффективного коэффициента размножения будет выглядеть следующим образом:

$$L_p^2 = 5,773^2 \cdot (1 - 0,753) + 1,289^2 \cdot 0,753 = 9,495 \text{ см}^2;$$

$$\tau_p^2 = 27,3 \left( \frac{1,408}{0,758} \right)^{0,5} = 37,205 \text{ см}^2;$$

$$M^2 = 27,3 + 5,773^2 = 60,623 \text{ см}^2;$$

$$\delta = 7,2 + 0,1 \cdot (60,623 - 40) = 9,262 \text{ см};$$

$$H_э = 270 + 2 \cdot 9,262 = 289 \text{ см};$$

$$R_э = \frac{246}{2} + 9,262 = 132 \text{ см};$$

$$B^2 = \left( \frac{\pi}{459} \right)^2 + \left( \frac{2,405}{217} \right)^2 = 4,493 \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-2};$$

$$k_{\text{эф}} = \frac{1,298 \cdot \exp(-4,493 \cdot 10^{-4} \cdot 37,205)}{1 + 4,493 \cdot 10^{-4} \cdot 9,495} = 1,271.$$

## 7 Многогрупповой расчёт

Для эффективного и быстрого расчёта спектра нейтронов используется многогрупповой метод, смысл которого в том, что вся область энергий нейтронов делится на некоторое число групп, в пределах каждой из которых сечения взаимодействия считаются независимыми от энергии нейтронов.

Перед началом расчёта необходимо ввести систему обозначений:

$m$  – число групп;

$k, i, j$  – текущий индекс группы;

$\varepsilon_j$  – доля нейтронов группы « $j$ »;

$D$  – коэффициент диффузии нейтронов, см;

$\Sigma_a^k, \Sigma_f^k$  – макроскопические сечения поглощения и деления группы « $k$ », см<sup>-1</sup>;

$\Sigma_{tr}^k$  – транспортное сечение группы « $k$ », см<sup>-1</sup>;

$\Sigma_3^k$  – полное сечение замедления группы « $k$ » во все нижележащие группы, см<sup>-1</sup>;

$\Sigma_3^{ik}$  – сечение замедления группы « $i$ » в группу « $k$ », см<sup>-1</sup>;

$\nu_f^j$  – выход нейтронов на одно деление в группе « $j$ ».

При расчётах следует использовать значения концентраций элементов после проведения гомогенизации первого вида, так как в таком случае учитывается доля элемента в ячейке. Кроме того, ввиду малости доли Cr, Ni и Ti в смеси, расчёт можно проводить без учёта наличия данных элементов.

Для каждого элемента и каждой группы рассчитывается:

$$\Sigma_a^k = N_i \cdot (\sigma_c^k + \sigma_f^k), \text{ см}^{-1}, \quad (47)$$

где  $N_i$  – ядерная концентрация элемента с учётом его доли в ячейке;

$\sigma_c^k$  – микроскопическое сечение захвата;

$\sigma_f^k$  – микроскопическое сечение деления;

$$\Sigma_3^k = N_i \cdot (\sigma_{3(e)}^k + \sigma_{in}^k - \sigma_{in}^{kk}), \text{ см}^{-1}, \quad (48)$$

где  $\sigma_{in}^k$  – сечение неупругого рассеяния при переходе в  $k$ -ю группу;

$\sigma_{in}^{kk}$  – сечение неупругого рассеяния, не вызывающее ухода из этой группы;

$$\Sigma_{tr}^k = N_i \cdot (\sigma_e^k \cdot (1 - \mu_e^k) + \sigma_f^k + \sigma_{in}^k + \sigma_c^k), \text{ см}^{-1}, \quad (49)$$

где  $\sigma_e^k$  – микроскопическое сечение упругого рассеяния;

$\mu_e^k$  – средний косинус угла рассеяния;

$$\Sigma_f^k = N_i \cdot \sigma_f^k, \text{ см}^{-1}, \quad (50)$$

$$\Sigma_{yb}^k = \Sigma_a^k + \Sigma_3^k, \text{ см}^{-1}, \quad (51)$$

$$\Sigma^{i \rightarrow i+1} = N_i \cdot (\sigma_{3(e)}^k + \sigma_{in(i,i+1)}^k), \text{ см}^{-1}, \text{ при } k = i + 1, \quad (52)$$

$$\Sigma^{i \rightarrow i+k} = N_i \cdot \sigma_{in(i,i+1)}^k, \text{ см}^{-1}, \text{ при } k > i + 1, \quad (53)$$

где  $\sigma_{3(e)}^k$  – сечение упругого замедления из  $i$ -й группы в  $k$ -ю.

Также стоит учитывать поправку на самоэкранировку  $U^{238}$ :

$$\sigma_0 = \frac{\sum_{i=1}^{m \neq 1} \sigma_t^m \cdot N_m}{N_8}, \text{ б}, \quad (54)$$

где  $\sigma_t^m$ ,  $N_m$  – полное сечение и ядерная концентрация « $m$ » элемента.

После определения  $\sigma_0$  следует найти значения поправок к сечениям  $f_i$ , с учетом которых рассчитывается  $\sigma_i = \sigma_i \cdot f_i(\sigma_0)$ .

Ниже в качестве примера представлен расчёт констант для 5-й группы.

Поправка на самоэкранировку  $U^{238}$ :

$$\begin{aligned} \sigma_0 &= \frac{N_5 \cdot \sigma_t^5 + N_{Fe} \cdot \sigma_t^{Fe} + N_H \cdot \sigma_t^H + N_O \cdot \sigma_t^O}{N_8} = \\ &= \frac{(0,0165 \cdot 6,60 + 0,7498 \cdot 2,90 + 3,6032 \cdot 4,10 + 3,2322 \cdot 4,30) \cdot 10^{22}}{0,6989 \cdot 10^{22}} = 44 \text{ б}. \end{aligned}$$

Поправки  $f_f, f_t, f_c, f_e$  равны 1 для всех элементов, за исключением  $f_c = 0,92$  для Fe.

Уход из группы за счёт замедления:

$U^{235}$ :

$$\sigma_3^5 = \sigma_{3(e)}^5 + \sigma_{in}^5 - \sigma_{in(5,5)} = 0,031 + 1,38 - 0,20 = 1,211 \text{ б.}$$

$U^{238}$ :

$$\sigma_3^5 = \sigma_{3(e)}^5 + \sigma_{in}^5 - \sigma_{in(5,5)} = 0,04 + 2,15 - 1,15 = 1,04 \text{ б.}$$

Fe:

$$\sigma_3^5 = \sigma_{3(e)}^5 + \sigma_{in}^5 - \sigma_{in(5,5)} = 0,12 + 0,37 - 0,01 = 0,48 \text{ б.}$$

O:

$$\sigma_3^5 = \sigma_{3(e)}^5 + \sigma_{in}^5 - \sigma_{in(5,5)} = 0,868 + 0 - 0 = 0,868 \text{ б.}$$

H:

$$\sigma_3^5 = \sigma_{3(e)}^5 = 3,12 \text{ б.}$$

Уход из группы за счёт поглощения:

$U^{235}$ :

$$\sigma_a^5 = \sigma_f^5 + \sigma_c^5 = 1,25 \cdot 0,12 = 1,37 \text{ б.}$$

$U^{238}$ :

$$\sigma_a^5 = \sigma_f^5 + \sigma_c^5 = 0,02 \cdot 0,13 = 0,15 \text{ б.}$$

Fe:

$$\sigma_a^5 = \sigma_c^5 \cdot f_c = 0,004 \cdot 0,92 = 0,00368 \text{ б.}$$

O:

$$\sigma_a^5 = \sigma_c^5 = 0 \text{ б.}$$

H:

$$\sigma_a^5 = \sigma_c^5 = 0 \text{ б.}$$

Увод нейтронов из группы:

$U^{235}$ :

$$\Sigma_{yb}^5 = (\sigma_a^5 + \sigma_3^5) \cdot N_5 = (1,37 + 1,211) \cdot 10^{-24} \cdot 0,0165 \cdot 10^{22} = 0,000425 \text{ см}^{-1}.$$

$U^{238}$ :

$$\Sigma_{\text{yb}}^5 = (\sigma_a^5 + \sigma_3^5) \cdot N_8 = (0,15 + 1,04) \cdot 10^{-24} \cdot 0,6989 \cdot 10^{22} = 0,008316 \text{ см}^{-1}.$$

Fe:

$$\Sigma_{\text{yb}}^5 = (\sigma_a^5 + \sigma_3^5) \cdot N_{\text{Fe}} = (0,00368 + 0,48) \cdot 10^{-24} \cdot 0,7498 \cdot 10^{22} = 0,003627 \text{ см}^{-1}.$$

O:

$$\Sigma_{\text{yb}}^5 = (\sigma_a^5 + \sigma_3^5) \cdot N_{\text{O}} = (0 + 0,868) \cdot 10^{-24} \cdot 3,2322 \cdot 10^{22} = 0,028056 \text{ см}^{-1}.$$

H:

$$\Sigma_{\text{yb}}^5 = (\sigma_a^5 + \sigma_3^5) \cdot N_{\text{H}} = (0 + 3,12) \cdot 10^{-24} \cdot 3,6032 \cdot 10^{22} = 0,112420 \text{ см}^{-1}.$$

Тогда полный увод нейтронов из 5-й группы:

$$\begin{aligned} \Sigma_{\text{yb}}^5 &= \Sigma_{\text{yb}}^5(\text{U}^5) + \Sigma_{\text{yb}}^5(\text{U}^5) + \Sigma_{\text{yb}}^5(\text{Fe}) + \Sigma_{\text{yb}}^5(\text{O}) + \Sigma_{\text{yb}}^5(\text{H}) = \\ &= 0,000425 + 0,008316 + 0,003627 + 0,028056 + 0,112420 = 0,1528 \text{ см}^{-1}. \end{aligned}$$

Транспортные параметры:

U<sup>235</sup>:

$$\sigma_{\text{tr}}^5 = \sigma_e^5 \cdot (1 - \mu_e^5) + \sigma_c^5 + \sigma_f^5 + \sigma_{\text{in}}^5 = 3,85 \cdot (1 - 0,45) + 0,12 + 1,25 + 1,38 = 4,8675 \text{ б.}$$

U<sup>238</sup>:

$$\sigma_{\text{tr}}^5 = \sigma_e^5 \cdot (1 - \mu_e^5) + \sigma_c^5 + \sigma_f^5 + \sigma_{\text{in}}^5 = 4,6 \cdot (1 - 0,42) + 0,13 + 0,02 + 2,15 = 4,968 \text{ б.}$$

Fe:

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{tr}}^5 &= \sigma_e^5 \cdot (1 - \mu_e^5) + \sigma_c^5 \cdot f_c + \sigma_f^5 + \sigma_{\text{in}}^5 = \\ &= 3,85 \cdot (1 - 0,24) + 0,004 \cdot 0,92 + 0 + 0,37 = 2,29648 \text{ б.} \end{aligned}$$

O:

$$\sigma_{\text{tr}}^5 = \sigma_e^5 \cdot (1 - \mu_e^5) + \sigma_c^5 + \sigma_f^5 + \sigma_{\text{in}}^5 = 4,3 \cdot (1 - 0,08) + 0 + 0 + 0 = 3,956 \text{ б.}$$

H:

$$\sigma_{\text{tr}}^5 = \sigma_e^5 \cdot (1 - \mu_e^5) + \sigma_c^5 + \sigma_f^5 + \sigma_{\text{in}}^5 = 4,1 \cdot (1 - 0,667) + 0 + 0 + 0 = 1,3653 \text{ б.}$$

В результате для 5-й группы:

$$\begin{aligned} \Sigma_{\text{tr}}^5 &= \Sigma_{\text{tr}}^5(\text{U}^5) + \Sigma_{\text{tr}}^5(\text{U}^5) + \Sigma_{\text{tr}}^5(\text{Fe}) + \Sigma_{\text{tr}}^5(\text{O}) + \Sigma_{\text{tr}}^5(\text{H}) = \\ &= 0,000801 + 0,034719 + 0,017219 + 0,127866 + 0,049195 = 0,2298 \text{ см}^{-1}; \end{aligned}$$

$$D^5 = \frac{1}{3 \cdot \Sigma_{\text{tr}}^5} = \frac{1}{3 \cdot 0,2298} = 1,4505 \text{ см.}$$

Поток для 5-й группы:

$$I^5 = \frac{\varepsilon_5 + \sum_3^{1 \rightarrow 2} \cdot I^1 + \sum_3^{2 \rightarrow 3} \cdot I^2 + \sum_3^{3 \rightarrow 4} \cdot I^3 + \sum_3^{4 \rightarrow 5} \cdot I^4}{B^2 \cdot D_5 + \sum_{\text{yb}}^5} =$$

$$= \frac{0,202 + 0,064603 \cdot 0,175541 + 0,021161 \cdot 1,019586}{0,000449 \cdot 1,450540 + 0,152843}$$

$$+ \frac{0,019036 \cdot 2,004787 + 0,033873 \cdot 2,855891}{0,000449 \cdot 1,450540 + 0,152843} = 2,409314.$$

Ценность для 5-й группы:

$$I_5^+ = \frac{v_f^5 \cdot \sum_f^5 + \sum_{i=6}^{26} \sum_3^{5 \rightarrow i} I_i^+}{B^2 \cdot D_5 + \sum_{\text{yb}}^5} = \frac{2,54 \cdot 0,000345 + 0,184274}{0,000449 \cdot 1,450540 + 0,152843} = 1,206238$$

Проверка потоков представляет из себя проверку условия:

$$K_{\text{эф}} = K_{\text{эф}}^+;$$

$$\sum_{j=1}^m v_f^j \sum_f^j I^j = \sum_{j=1}^m \varepsilon_j I_j^+ = 1,276.$$

Результаты многогруппового расчёта приведены в Приложении В. Спектры потоков и ценностей представлены на рисунках 8 и 9 соответственно.

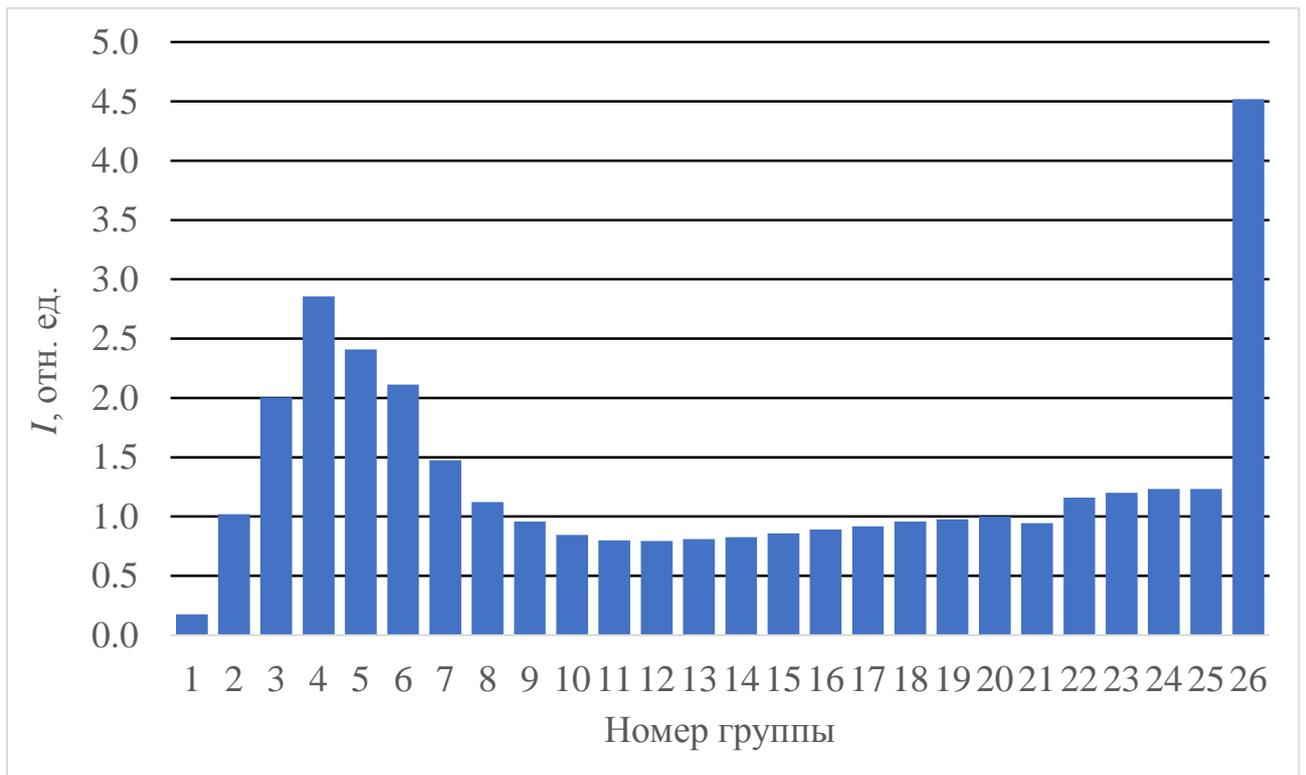


Рисунок 8 – Спектр потоков нейтронов

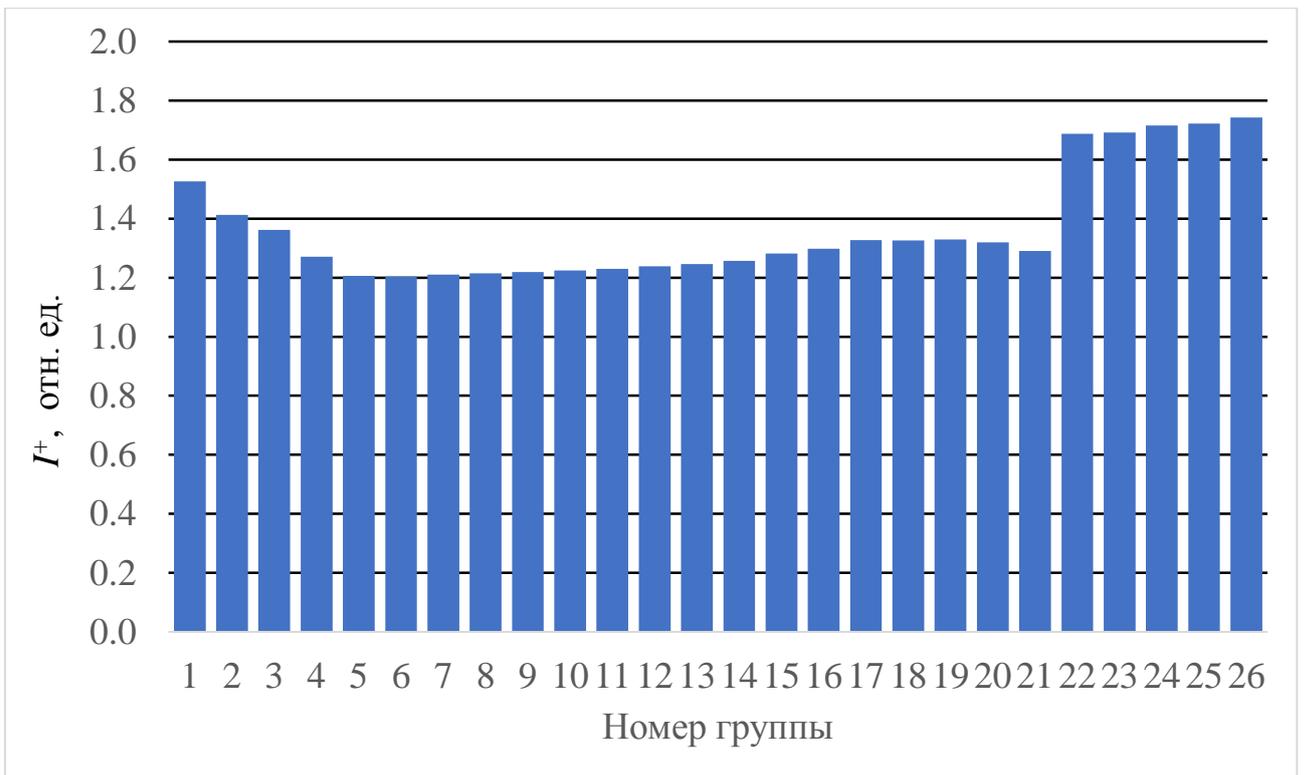


Рисунок 9 – Спектр ценностей нейтронов

## Заключение

Цель курсового проекта, представляющая из себя проведение нейтронно-физического расчёта, выполнена путём последовательного выполнения поставленных задач.

Проведён обзор особенностей конструкции реактора типа ВВЭР. Для элементарной ячейки реактора такого типа в ходе предварительного расчёта найдена скорость прокачки теплоносителя, необходимая для отвода тепла,  $v = 3,70$  м/с.

Рассчитаны ядерно-физические характеристики «холодного» реактора – концентрации элементов, их микро- и макросечения в случае как гетерогенной, так и гомогенизированной ячейки.

Определены коэффициенты:  $\mu = 1,021$ ,  $\phi = 0,819$ ,  $\theta = 0,753$ ,  $\eta = 2,062$ . По формуле четырёх сомножителей найден коэффициент размножения нейтронов в бесконечной среде  $k_{\infty} = 1,298$ . Кроме того, найден эффективный коэффициент размножения  $k_{\text{эф}} = 1,271$ .

Проведена оптимизация параметров ячейки, в результате выявлено оптимальное значение  $k_{\infty} = 1,325$ , при котором  $h_{\text{яч}} = 1,125$  см,  $R_{\text{топли}} = 0,4465$  см,  $v = 4,89$  м/с.

Проведён многогрупповой расчёт спектра нейтронов и коэффициента размножения. Спектры потоков и ценностей нейтронов представлены в виде графиков.

## Список литературы

1. Госкорпорация «Росатом» [Электронный ресурс] // Генерация электроэнергии: [сайт]. – Режим доступа: <https://rosatom.ru/production/generation/> свободный. – Загл. с экрана (дата обращения 15.11.2022).
2. Реакторы ВВЭР-1000 для атомных электростанций / В. К. Резепов [и др.]. – М.: [Гидропресс]: [Академкнига], 2004. – 333 с.
3. Портал инженера [Электронный ресурс] // Реактор ВВЭР-1000. Состав и общее описание: [сайт]. – Режим доступа: <https://ingeneriyi.info/atomnaya-energetika/3308-reaktor-vver01000-sostav-i-obschee-opisanie.html/> свободный. – Загл. с экрана (дата обращения 15.11.2022).
4. Марочник сталей и сплавов. 4-е изд., переработ. и доп. / Ю.Г. Драгунов [и др.]; Под общей ред. Ю.Г. Драгунова и А.С. Зубченко. – М., 2014 – 1216 с.
5. Конструкции твэлов, каналов и активных зон энергетических реакторов: учебное пособие / Г.Н. Колпаков, О.В. Селиваникова. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 118 с.
6. Абагян Л.П. Групповые константы для расчета ядерных реакторов и защиты: Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1981. – 137 с.
7. Основы теории и методы расчета ядерных энергетических реакторов: Учеб. пособие для вузов / Г.Г. Бартоломей [и др.]; Под ред. Г.А. Батя. – М.: Энергоиздат, 1982. – 511 с.
8. Мерзликин Г.Я. Основы теории ядерных реакторов. Курс для эксплуатационного персонала АЭС. – Севастополь: СИЯЭиП, 2001. – 341 с.
9. Теория переноса нейтронов: Учебное пособие / Э.Ф. Крючков, Л.Н. Юрова – М.: МИФИ, 2007. – 272 с.
10. 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 элементов

Материал	Величина		
	$N, 10^{22}$ ядер/см <sup>3</sup>	$N (r1), 10^{22}$ ядер/см <sup>3</sup>	$N (r2), 10^{22}$ ядер/см <sup>3</sup>
U <sup>235</sup>	0,0539	0,0165	0,0356
U <sup>238</sup>	2,2884	0,6989	1,5136
O(топл.)	4,6846	1,4306	3,0985
UO <sub>2</sub>	2,3423	–	–
H	6,6922	3,6032	6,6922
O(тн.)	3,3461	1,8016	3,3461
H <sub>2</sub> O	3,3461	–	–
Cr	1,6471	0,2019	0,4372
Ni	0,7258	0,0890	0,1927
Ti	0,0991	0,0122	0,0263
Fe	6,1176	0,7498	1,6240

## Приложение Б

(обязательное)

Таблица Б.1 – Микроскопические и макроскопические сечения элементов

Материал	Величина									
	$\sigma_a, б$	$\sigma_f, б$	$\sigma_s, б$	$\sigma_{tr}, б$	$\Sigma_a, см^{-1}$	$\Sigma_f, см^{-1}$	$\Sigma_s, см^{-1}$	$\Sigma_{tr}, см^{-1}$	$\xi$	$\xi\Sigma_s, см^{-1}$
U <sup>235</sup>	496,076	422,718	15	538,718	0,2672	0,2277	0,0081	0,2902	0,0085	0,00007
U <sup>238</sup>	2,050	–	9	11,710	0,0469	–	0,2060	0,2680	0,0084	0,00173
O(топл.)	–	–	3,75	3,6	–	–	0,1757	0,1686	0,1199	0,02107
UO <sub>2</sub>	–	–	–	–	0,3142	0,2277	0,3897	0,7268	0,0587	0,02287
H	0,251	–	20,3	7,092	0,0168	–	1,3585	0,4746	0,9998	1,35829
O(тн.)	–	–	3,75	3,6	–	–	0,1255	0,1205	0,1199	0,01505
H <sub>2</sub> O	–	–	–	–	0,0168	–	1,4840	0,5951	0,9254	1,37334
Cr	2,345	–	4,2	7,258	0,0386	–	0,0692	0,1195	0,0380	0,00263
Ni	3,480	–	17	21,430	0,0253	–	0,1234	0,1555	0,0335	0,00414
Ti	4,388	–	4,2	9,958	0,0043	–	0,0042	0,0099	0,0411	0,00017
Fe	1,914	–	11,4	13,816	0,1171	–	0,6974	0,8452	0,0353	0,02461

Таблица Б.2 – Микроскопические и макроскопические сечения элементов после проведения гомогенизации

Материал	Величина									
	Гомогенизация первого вида					Гомогенизация второго вида				
	$\Sigma_a, \text{см}^{-1}$	$\Sigma_f, \text{см}^{-1}$	$\Sigma_s, \text{см}^{-1}$	$\Sigma_{tr}, \text{см}^{-1}$	$\xi\Sigma_s, \text{см}^{-1}$	$\Sigma_a, \text{см}^{-1}$	$\Sigma_f, \text{см}^{-1}$	$\Sigma_s, \text{см}^{-1}$	$\Sigma_{tr}, \text{см}^{-1}$	$\xi\Sigma_s, \text{см}^{-1}$
U <sup>235</sup>	0,0816	0,0695	0,0025	0,0886	0,00002	0,1768	0,1506	0,0053	0,1920	0,00005
U <sup>238</sup>	0,0143	–	0,0629	0,0818	0,00053	0,0310	–	0,1362	0,1772	0,00114
O(топл.)	–	–	0,0536	0,0515	0,00643	–	–	0,1162	0,1115	0,01394
UO <sub>2</sub>	0,0959	0,0695	0,1190	0,2220	0,00698	0,2078	0,1506	0,2578	0,4808	0,01512
H	0,0091	–	0,7314	0,2555	0,73133	0,0168	–	1,3585	0,4746	1,35829
O(тн.)	–	–	0,0676	0,0649	0,00810	–	–	0,1255	0,1205	0,01505
H <sub>2</sub> O	0,0091	–	0,7990	0,3204	0,73943	0,0168	–	1,4840	0,5951	1,37334
Cr	0,0047	–	0,0085	0,0147	0,00032	0,0103	–	0,0184	0,0317	0,00070
Ni	0,0031	–	0,0151	0,0191	0,00051	0,0067	–	0,0328	0,0413	0,00110
Ti	0,0005	–	0,0005	0,0012	0,00002	0,0012	–	0,0011	0,0026	0,00005
Fe	0,0144	–	0,0855	0,1036	0,00302	0,0311	–	0,1851	0,2244	0,00653

## Приложение В

(обязательное)

Таблица В.1 – Многогрупповые константы

№	$\Sigma_a(A3), \text{см}^{-1}$	$\Sigma_s(A3), \text{см}^{-1}$	$\Sigma_{yb}, \text{см}^{-1}$	$\Sigma_{tr}(A3), \text{см}^{-1}$	$D, \text{см}$	$\Sigma_f(A3), \text{см}^{-1}$	$\varepsilon$	$\nu_f$	$I$	$I^+$
1	0,014909	0,074358	0,089267	0,079691	4,182848	0,007276	0,016	3,47	0,175541	1,525963
2	0,006731	0,089178	0,095908	0,098290	3,391325	0,004243	0,088	3,08	1,019586	1,412952
3	0,004517	0,102458	0,106975	0,122425	2,722762	0,004259	0,184	2,86	2,004787	1,362393
4	0,004086	0,114255	0,118342	0,137573	2,422963	0,003635	0,270	2,66	2,855891	1,270632
5	0,001301	0,151542	0,152843	0,229799	1,450540	0,000345	0,202	2,54	2,409314	1,206238
6	0,001176	0,177381	0,178557	0,261439	1,274994	0,000202	0,141	2,46	2,113782	1,204496
7	0,001366	0,237610	0,238976	0,285689	1,166769	0,000232	0,061	2,47	1,476058	1,210436
8	0,001928	0,310706	0,312634	0,335919	0,992303	0,000280	0,024	2,45	1,121840	1,215217
9	0,002943	0,373434	0,376377	0,400996	0,831264	0,000345	0,010	2,44	0,958184	1,218651
10	0,003911	0,442007	0,445918	0,512012	0,651027	0,000436	0,003	2,43	0,844954	1,224530
11	0,004953	0,485595	0,490548	0,464302	0,717924	0,000559	0,001	2,42	0,799777	1,229756
12	0,006104	0,509095	0,515199	0,517552	0,644057	0,000717	0	2,42	0,794804	1,238954
13	0,008323	0,519336	0,527659	0,507721	0,656528	0,000880	0	2,42	0,809300	1,246367
14	0,011848	0,527111	0,538959	0,518966	0,642303	0,001165	0	2,42	0,826362	1,256892
15	0,013427	0,528274	0,541700	0,537090	0,620629	0,001701	0	2,42	0,858524	1,282245
16	0,012569	0,531798	0,544367	0,526435	0,633190	0,002369	0	2,42	0,891743	1,298381
17	0,020669	0,535672	0,556341	0,567296	0,587583	0,003004	0	2,42	0,916843	1,327326
18	0,019047	0,536382	0,555429	0,544198	0,612522	0,004434	0	2,42	0,959127	1,326760
19	0,032871	0,540728	0,573599	0,576821	0,577880	0,005182	0	2,42	0,977376	1,329582
20	0,048431	0,537374	0,585805	0,577286	0,577414	0,004738	0	2,42	0,999913	1,320057
21	1,013458	0,535920	0,645934	0,628246	0,530578	0,003774	0	2,42	0,944450	1,290286
22	0,010399	0,535160	0,545559	0,519825	0,641241	0,002961	0	2,42	1,158708	1,687404
23	0,014193	0,535162	0,549355	0,523785	0,636394	0,005010	0	2,42	1,200265	1,691424
24	0,022208	0,535164	0,557372	0,531964	0,626609	0,010529	0	2,42	1,233620	1,7152421
25	0,046298	0,535165	0,581463	0,556218	0,599285	0,025501	0	2,42	1,232414	1,722109
26	0,158408	0	0,158408	0,668329	0,498756	0,091920	0	2,42	4,519472	1,742279

