

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 Ядерная физика и технологии
Отделение ядерно-топливного цикла

Индивидуальное домашнее задание

Тема работы
Нейтронно-физический расчет ядерного реактора

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0A7B	Тутолмин И.Е.		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Кузнецов М.С.	К.Т.Н		

Томск – 2020 г.

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

1. Исходные данные:

- тип реактора: УГР;
- тепловая мощность: 3000 МВт;
- ядерное горючее: UO_2 ;
- обогащение топлива по U-235: 2,5 %;
- теплоноситель: вода;
- температура теплоносителя на входе: 180 °С;
- температура теплоносителя на выходе: 260 °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 Графито-водные реакторы	5
1.1 РБМК.....	6
1.1.1 РБМК-1000.....	6
1.1.2 РБМК-1500.....	7
1.2 ЭГП – 6.....	8
1.3 МКЭР	9
2 Нейтронно-физические параметры критического стационарного ядерного реактора	10
2.1 Предварительный расчет	10
3 Физический расчет реактора	14
3.1 Ядерно-физические характеристики «холодного» реактора	14
3.2 Гомогенизация.....	18
3.3 Расчет коэффициента размножения в бесконечной среде	19
3.3.1 Вероятность избежать резонансного захвата.....	20
3.3.2 Коэффициент размножения на быстрых нейтронах.....	21
3.3.3 Коэффициент использования тепловых нейтронов.....	22
3.3.4 Число вторичных нейтронов на один поглощенный в топливе.....	24
3.4 Расчет эффективного коэффициента размножения.....	24
3.5 Оптимизация.....	27
Заключение	33
Список использованных источников	34
Приложение А	35
Приложение Б.....	36

Введение

Нейтронно-физический расчет реактора является неотъемлемой частью при проектировании и строительстве ядерных реакторов, чтобы понимать допустимые уровни мощности, загрузки топлива, размеры конструкционных материалов, а также чтобы убедиться, что реактор будет соответствовать всем высоким требованиям ядерной безопасности.

В представленной работе будет произведен нейтронно-физический расчет графито-водного реактора мощностью 3000 МВт с топливом из диоксида урана обогащением 2,5%. В частности будут оценены размеры активной зоны, рассчитаны коэффициенты размножения и другие нейтронно-физические параметры «холодного» реактора, а затем будет произведена оптимизация.

Также в работе представлен обзор на графито-водные реакторы.

1 Графито-водные реакторы

Графито-водный ядерный реактор — гетерогенный ядерный реактор, использующий в качестве замедлителя графит, а в качестве теплоносителя — обычную (лёгкую) воду.

По уран-графитовой схеме были сделаны первые экспериментальные и промышленные реакторы, а также реакторы для АЭС. В том числе реактор первой в мире АЭС был уран-графитовым (Реактор АМ). Промышленные реакторы этого типа для наработки плутония строились и эксплуатировались всеми государствами, обладающими ядерным оружием, но энергетические реакторы - только в СССР. Срок службы реакторов данного типа составляет 45 лет, дальнейшего развития реакторы не получили. Последний реактор (РБМК-1000) построен в 1990 году, будет выведен из эксплуатации в конце 2034 года.

На конец 2011 года в мире работало 15 реакторов, относящихся к данному типу, все они расположены в странах бывшего СССР.

По состоянию на 1 января 2019 года в России эксплуатируются 10 реакторов типа РБМК (РБМК-1000) и 3 реактора типа ЭГП (ЭГП-6).

Достоинства:

- возможность использования в сочетании с графитом различных теплоносителей (низкотемпературных, высокотемпературных);
- высокий коэффициент воспроизводства;
- перегрузки на мощности;
- низкое обогащение;
- высокая теплопроводность графита (отпадает необходимость в его дополнительном охлаждении).

Недостатки:

- относительно малая замедляющая способность и большая длина замедления в графите (большой размер АкЗ, низкая плотность тепловыделения);

- энергия Вигнера (при длительной работе изменяются физико-механические свойства и размеры графита, происходит накопление внутренней энергии);
- пористость графита (проникновение теплоносителя влияет на реактивность).

1.1 РБМК

1.1.1 РБМК-1000

Основу активной зоны РБМК-1000 составляет графитовый цилиндр высотой 7 м и диаметром 11,8 м, сложенный из блоков меньшего размера, который выполняет роль замедлителя [1]. Графит пронизан большим количеством вертикальных отверстий, через каждое из которых проходит труба давления (также называемая технологическим каналом (ТК)). Центральная часть трубы давления, расположенная в активной зоне, изготовлена из сплава циркония с ниобием ($Zr + 2,5 \% Nb$), обладающего высокой механической и коррозионной устойчивостью, верхние и нижние части трубы давления — из нержавеющей стали. Циркониевая и стальные части трубы давления соединены сварными переходниками.

В каждом топливном канале установлена кассета, составленная из двух тепловыделяющих сборок (ТВС) — нижней и верхней. В каждую сборку входит 18 стержневых твэлов. Оболочка твэла заполнена таблетками из диоксида урана. По первоначальному проекту обогащение по урану-235 составляло 1,8 %, но, по мере накопления опыта эксплуатации РБМК, оказалось целесообразным повышать обогащение. Повышение обогащения в сочетании с применением выгорающего поглотителя в топливе позволило увеличить управляемость реактора, повысить безопасность и улучшить его экономические показатели. В настоящее время осуществлён переход на топливо с обогащением 2,8 %.

Реактор РБМК работает по одноконтурной схеме. Циркуляция теплоносителя осуществляется в контуре многократной принудительной циркуляции (КМПЦ). В активной зоне вода, охлаждающая твэлы, частично испаряется и образующаяся пароводяная смесь поступает в барабаны-сепараторы. В барабан-сепараторах происходит сепарация пара, который поступает на турбоагрегат. Остающаяся вода смешивается с питательной водой и с помощью главных циркуляционных насосов (ГЦН) подается в активную зону реактора. Отсепарированный насыщенный пар (температура ~284 °С) под давлением 70—65 кгс/см² поступает на два турбогенератора электрической мощностью по 500 МВт. Отработанный пар конденсируется, после чего, пройдя через регенеративные подогреватели и деаэрактор, подается с помощью питательных насосов (ПЭН) в КМПЦ.

Реакторы РБМК-1000 установлены на Ленинградской АЭС, Курской АЭС, Чернобыльской АЭС, Смоленской АЭС.

1.1.2 РБМК-1500

В РБМК-1500 мощность повышена за счёт увеличения удельной энергонапряжённости активной зоны путём увеличения мощности топливных каналов в 1,5 раза при сохранении его конструкции [2]. Это достигается интенсификацией теплосъёма с твэлов при помощи применения специальных интенсификаторов теплообмена (турбулизаторов) в верхней части обеих ТВС. Всё вместе это позволяет сохранить прежние габариты и общую конструкцию реактора.

В процессе эксплуатации выяснилось, что из-за высоких неравномерностей энерговыделения, периодически возникающие повышенные (пиковые) мощности в отдельных каналах приводят к растрескиванию оболочек твэлов. По этой причине мощность была снижена до 1300 МВт.

Данные реакторы были установлены на Игналинской АЭС (Литва).

1.2 ЭГП – 6

ЭГП-6 (Энергетический Гетерогенный Петлевой реактор с 6-ю петлями циркуляции теплоносителя) — энергетический графито-водный гетерогенный реактор канального типа на тепловых нейтронах с естественной циркуляцией, реализующий схему прямого цикла [3]. Её прототипом являются реакторные установки АМ и АМБ. Все четыре ЭГП-6 установлены на Билибинской АЭС, пуск с 1974 по 1976 год. Реактор используется для производства как электрической, так и тепловой энергии.

Реактор ЭГП-6 — изменённая версия реакторов АМБ-100 и –200, разработанных НИКИЭТ под научным руководством ФЭИ и эксплуатировавшихся на Белоярской АЭС. Особенностью конструкции является естественная циркуляция теплоносителя. Выработка насыщенного пара производится в каналах активной зоны. В дальнейшем направление ЭГП не получило развития в реакторостроении.

Данный тип малой АЭС (атомная теплоэлектроцентраль с четырьмя блоками по 12 МВт установленной электрической мощности) можно назвать самым удачным из всех советских проектов малых АЭС (пример: ТЭС-3, АРБУС (Арктическая блочная установка), «Памир»). Реакторы, запущенные в середине 1970-х годов, продолжают оставаться в строю до сих пор и будут работать, пока их не сменит новейшая плавучая атомная электростанция (ПАТЭС) в Певеке. Все четыре блока Билибинской АЭС успешно отработали весь назначенный срок службы (30 лет) и их эксплуатация была продлена ещё на 15 лет.

Поскольку энергоблоки работают в изолированной Чаун-Билибинской энергосистеме Чукотского автономного округа и обеспечивают 80 % производства электроэнергии в ней, реакторы рассчитаны на систематическую работу в режиме переменных нагрузок.

1.3 МКЭР

Многопетлевой энергетический реактор (МКЭР) — серия энергетических кипящих уран-графитовых реакторов третьего поколения с естественной циркуляцией теплоносителя, разработанных в 1990-2000-е годы. Реакторы МКЭР являются эволюционным развитием серии канальных реакторов РБМК с учётом полученного опыта при эксплуатации данных реакторов, а так же современных требований по безопасности АЭС. Реакторы МКЭР разрабатывались в первую очередь для замены выводящихся из эксплуатации энергоблоков с реакторами РБМК.

В процессе разработки реактора МКЭР-800 был учтён опыт эксплуатации водо-графитовых канальных реакторов типа серии РБМК, и был сделан упор на совершенствование пассивных систем безопасности реакторной установки, а так же усовершенствование средств предупреждения и локализации возможных аварий. В проекте реактора МКЭР-800 были внесены ряд новшеств, в частности: увеличено количество независимых петель контура многократной принудительной циркуляции (КМПЦ), по сравнению с реакторами серии РБМК, что позволило уменьшить максимальный диаметр трубопроводов циркуляционного контура до 300 мм. За счёт естественной циркуляции теплоносителя из системы КМПЦ были исключены главные циркулирующие насосы (ГЦН), интенсификация циркуляции происходит за счёт струйных насосов (инжекторов). Шахматное соединение топливных каналов к раздающим коллекторам, позволило обеспечить теплоотвод через соседние каналы при возможной потере теплоносителя и разрушении коллектора, тем самым исключая нагрев топлива до потери герметичности оболочки. За счёт реализации оптимального уран-графитового соотношения, в МКЭР было обеспечено улучшение нейтронно-физических характеристик реактора, и повышены свойства самозащищенности активной зоны реакторной установки.

2 Нейтронно-физические параметры критического стационарного ядерного реактора

2.1 Предварительный расчет

Для проведения расчета были приняты следующие величины:

- средняя удельная объемная нагрузка – $N_0 = 5$ кВт/л;
- коэффициент увеличения объема реактора за счёт СУЗ – $\eta = 1,3$;
- отношение высоты к диаметру – $m = 0,7$;
- объемный коэффициент неравномерности – $K_V = 2,3$;
- осевой коэффициент неравномерности – $K_Z = 1,3$;
- размер ячейки под ключ – $H_{яч} = 25$ см;
- число ТВЭЛов в кассете – $n = 18$;
- радиус топливной таблетки – $r = 0,3$ см;
- радиус наружной оболочки ТВЭЛ – $0,68$ см;
- радиус внутренней оболочки ТВЭЛ – $0,585$ см;
- внутренний диаметр топливного канала – $8,4$ см;
- внешний диаметр топливного канала – $8,8$ см.

Схема расчета реактора на тепловых нейтронах начинается с предварительной оценки размеров активной зоны, которые обеспечили бы нужный теплосъем при заданной мощности реактора.

В гетерогенных реакторах максимально допустимая тепловая нагрузка на поверхности тепловыделяющих элементов является важным параметром, который определяет размеры активной зоны при заданном шаге решетки.

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

$$V_{a.з} = \frac{N}{N_0} \eta, \text{ см}^3; \quad (2.1.1)$$

$$D_{a.3} = \sqrt[3]{\frac{4V_{a.3}}{\pi m}}, \text{ см}; \quad (2.1.2)$$

$$H_{a.3} = mD_{a.3}, \text{ см}, \quad (2.1.3)$$

где $V_{a.3}, D_{a.3}, H_{a.3}$ – объем, диаметр и высота активной зоны;

m – отношение высоты к диаметру;

N – заданная тепловая мощность реактора, МВт;

η – коэффициент, учитывающий увеличение объема реактора. вследствие размещения регулирующих стержней, коэффициент отличается от единицы, если регулирующие стержни занимают отдельные ячейки реактора.

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

$$N_{0_{\max}} = \overline{N}_0 \cdot K_v, \text{ Вт/см}^3, \quad (2.1.4)$$

где K_v – объемный коэффициент неравномерности плотности потока нейтронов;

\overline{N}_0 – средняя удельная объемная нагрузка, Вт/см³.

Максимально допустимая тепловая нагрузка:

$$q_{\max} = \frac{N_{0_{\max}} \cdot S_{яч}}{116 \cdot \Pi_0}, \text{ Гкал/м}^2 \cdot \text{ч}, \quad (2.1.5)$$

где Π_0 – периметр тепловыделяющей поверхности одного твэла, см;

$S_{яч}$ – площадь сечения элементарной ячейки, см².

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

$$v = \frac{q_{\max} \cdot \Pi_0 \cdot H_{a.3}}{3,6 \cdot K_z \cdot \rho \cdot \Delta i \cdot S_{mn}}, \text{ м/с}; \quad (2.1.6)$$

где v – скорость прокачки теплоносителя;

K_z – осевой коэффициент неравномерности плотности потока нейтронов, см²;

S_{mn} – площадь сечения прохода теплоносителя, приходящаяся на тепловыделяющую сборку, см²;

ρ – плотность теплоносителя при рабочих параметрах, г/см³;

Δi – разность теплосодержания теплоносителя на входе и выходе, ккал/кг.

Данная величина определяется по следующей формуле:

$$\Delta i = C_p (t_{\text{вых}} - t_{\text{вх}}), \text{ ккал/кг}, \quad (2.1.7)$$

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

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

Объем активной зоны:

$$V_{a.z} = \frac{N}{N_0} \eta = \frac{3 \cdot 10^9}{5} \cdot 1,3 = 780 \text{ м}^3.$$

Диаметр активной зоны:

$$D_{a.z} = \sqrt[3]{\frac{4V_{a.z}}{\pi m}} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 780}{3,14 \cdot 0,7}} = 11,24 \text{ м}.$$

Высота активной зоны:

$$H_{a.z} = m D_{a.z} = 0,7 \cdot 11,24 = 7,87 \text{ м}.$$

Максимальная удельная объемная нагрузка активной зоны:

$$N_{0_{\text{max}}} = \overline{N_0} \cdot K_v = 5 \cdot 2,3 = 11,5 \text{ кВт/см}^3$$

Для определения максимально допустимой тепловой нагрузки необходимо вычислить периметр всех тепловыделяющих элементов в канале и площадь элементарной ячейки.

Периметр тепловыделяющего элемента:

$$P_0 = \pi \cdot d = 3,14 \cdot 1,36 = 4,27 \text{ см.}$$

Площадь элементарной ячейки имеет форму квадрата:

$$S_{яч} = a^2 = 25^2 = 625 \text{ см}^2.$$

Тогда, максимально допустимая тепловая нагрузка:

$$q_{\max} = \frac{N_{0,\max} \cdot S_{яч}}{116 \cdot P_0} = \frac{5 \cdot 6,25}{116 \cdot 4,27} = 0,807 \text{ Гкал/м}^2 \cdot \text{ч.}$$

Для определения скорости прокачки теплоносителя необходимо вычислить площадь, приходящуюся на теплоноситель и разность теплосодержания теплоносителя на выходе.

Площадь внутренней части канала:

$$S_{\text{кан}} = \frac{\pi \cdot d_{\text{вн.тк}}^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 8,4^2}{4} = 55,39 \text{ см}^2.$$

Площадь, приходящаяся на твэлы:

$$S_{\text{твэлов}} = \frac{\pi \cdot d_{\text{внеш.тв.}}^2}{4} \cdot n = \frac{3,14 \cdot 1,36^2}{4} \cdot 7 = 26,13 \text{ см}^2.$$

Площадь сечения прохода теплоносителя:

$$S_{\text{тн}} = \frac{S_{\text{кан}} - (n+1) \cdot S_{\text{твэлов}}}{n+1} = \frac{S_{\text{кан}} - (n+1) \cdot S_{\text{твэлов}}}{n+1} = 1,46 \text{ см}^2.$$

При рабочих параметрах плотность и теплоемкость теплоносителя составляют $0,929 \text{ г/см}^3$ и $1,02 \text{ ккал/(кг} \cdot \text{градус)}$. Разность теплосодержания теплоносителя на выходе:

$$\Delta i = C_p (t_{\text{вых}} - t_{\text{вх}}) = 1,02 \cdot (260 - 180) = 81,6 \text{ ккал/кг.}$$

Скорость прокачки теплоносителя:

$$v = \frac{q_{\max} \cdot P_0 \cdot H_{a.з}}{3,6 \cdot K_z \cdot \rho \cdot \Delta i \cdot S_{\text{тн}}} = \frac{0,807 \cdot 4,27 \cdot 7,87}{3,6 \cdot 1,3 \cdot 0,929 \cdot 81,6 \cdot 1,46} = 5,22 \text{ м/с.}$$

Таким образом, рассчитанная скорость прокачки теплоносителя удовлетворяет указанным требованиям для реакторов с жидким теплоносителем $v < 10 \text{ м/с}$.

3 Физический расчет реактора

3.1 Ядерно-физические характеристики «холодного» реактора

Необходимо рассчитать нейтронно-физические характеристики (сечения взаимодействия, замедляющие свойства) для каждой зоны (топливо, оболочка, теплоноситель, замедлитель), т.к. каждая из них состоит из материалов с разными свойствами взаимодействия с нейтронами. Температура всех элементов реактора принимается 20 °С.

Ядерная концентрация для каждого элемента находится по формуле:

$$N = \frac{N_A \cdot \rho}{A}, \text{ молекул/см}^3, \quad (3.1.1)$$

где N_A – постоянная Авогадро, моль⁻¹;

ρ – весовая концентрация элемента, г/см³;

A – атомный вес элемента, г/моль;

Вычисление ядерных концентраций производится для каждого элемента активной зоны и отражателя. Результаты расчета представлены в приложении А.

Ниже представлен расчет концентрации ядерного топлива:

– концентрация UO₂:

$$N_{UO_2} = \frac{N_A \cdot \rho_{UO_2}}{A_{UO_2}} = \frac{6,023 \cdot 10^{23} \cdot 10,97}{270} = 2,45 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3},$$

– концентрация U²³⁵:

$$N_{U^{235}} = N_{UO_2} \cdot \omega = 2,45 \cdot 10^{22} \cdot 0,025 = 6,12 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3},$$

где ω – обогащение по U²³⁵;

– концентрация U²³⁸:

$$N_{U^{238}} = N_{UO_2} \cdot (1 - \omega) = 2,45 \cdot 10^{22} \cdot (1 - 0,025) = 2,39 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3},$$

– концентрация O₂:

$$N_{O_2} = 2 \cdot N_{UO_2} = 4,89 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3},$$

Для определения сечений деления и поглощения, отнесенных к средней скорости тепловых нейтронов, пользуются формулами:

$$\bar{\sigma}_f = \sigma_{f_0} \cdot 0,884 \cdot f_f \cdot \sqrt{\frac{293}{T_{н.г}}}; \quad (3.1.2)$$

$$\bar{\sigma}_a = \sigma_{a_0} \cdot 0,884 \cdot f_a \cdot \sqrt{\frac{293}{T_{н.г}}}; \quad (3.1.3)$$

где σ_a, σ_f – табличные значения сечений, барн;

f_a, f_f – поправочный коэффициент f , учитывающий отклонение сечения поглощения и деления от закона $1/v^2$;

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

Температура нейтронного газа принята равной $T_{н.г} = 393$ К. При таком значении температуры, поправочный коэффициент равен $f_f = 0,95867$ и $f_a = 0,95867$ для делящихся нуклидов и $f_a = 1$ для неделящихся нуклидов.

Макроскопические сечения вычисляются по формуле:

$$\Sigma_i = N_i \cdot \sigma_i, \text{ см}^{-1}. \quad (3.1.4)$$

Ниже представлен расчет микроскопических и макроскопических сечений для топлива. Остальные результаты приведены в приложении А.

Микросечения для U^{235} :

$$\sigma_a^{U^{235}} = 683 \cdot 0,884 \cdot 0,96 \cdot \sqrt{\frac{293}{393}} = 499,78 \text{ барн};$$

$$\sigma_f^{U^{235}} = 582 \cdot 0,884 \cdot 0,95867 \cdot \sqrt{\frac{293}{393}} = 425,88 \text{ барн};$$

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

$$\sigma_{tr}^{U^{235}} = \sigma_a^{U^{235}} + \sigma_s^{U^{235}} (1 - \mu_s) = 499,78 + 15(1 - 0) = 514,78 \text{ барн};$$

Микросечения для U^{238} :

$$\sigma_f^{U^{238}} = 0$$

$$\sigma_a^{U^{238}} = 2,71 \cdot 0,884 \cdot 1 \cdot \sqrt{\frac{293}{393}} = 2,07 \text{ барн};$$

$$\sigma_s^{U^{238}} = 9 \text{ барн};$$

$$\sigma_{tr}^{U^{238}} = \sigma_a^{U^{238}} + \sigma_s^{U^{238}} (1 - \mu_s) = 2,07 + 9(1 - 0) = 11,07 \text{ барн.}$$

Микросечения для O₂:

$$\sigma_s^O = 3,75 \text{ барн};$$

$$\sigma_{tr}^O = \sigma_a^O + \sigma_s^O (1 - \mu_s) = 0 + 3,75(1 - 0,04) = 3,6 \text{ барн.}$$

Макросечения для U²³⁵:

$$\Sigma_f^{U^{235}} = 425,88 \cdot 10^{-24} \cdot 6,12 \cdot 10^{20} = 0,261 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_a^{U^{235}} = 499,78 \cdot 10^{-24} \cdot 6,12 \cdot 10^{20} = 0,306 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_s^{U^{235}} = 15 \cdot 10^{-24} \cdot 6,12 \cdot 10^{20} = 9,18 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_{tr}^{U^{235}} = 514,78 \cdot 10^{-24} \cdot 6,12 \cdot 10^{20} = 0,315 \text{ см}^{-1}.$$

Макросечения для U²³⁸:

$$\Sigma_a^{U^{238}} = 2,07 \cdot 10^{-24} \cdot 2,39 \cdot 10^{22} = 4,95 \cdot 10^{-2} \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_s^{U^{238}} = 9 \cdot 10^{-24} \cdot 2,39 \cdot 10^{22} = 0,22 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_{tr}^{U^{238}} = 11,07 \cdot 10^{-24} \cdot 2,39 \cdot 10^{22} = 0,26 \text{ см}^{-1}.$$

Макросечения для O₂:

$$\Sigma_s^{O_2} = 3,75 \cdot 10^{-24} \cdot 4,89 \cdot 10^{22} = 0,183 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_{tr}^{O_2} = 3,6 \cdot 10^{-24} \cdot 4,89 \cdot 10^{22} = 0,176 \text{ см}^{-1}.$$

Макросечения для UO₂:

$$\Sigma_a^{UO_2} = \Sigma_a^{U^{235}} + \Sigma_a^{U^{238}} = 0,306 + 0,0495 = 0,356 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_f^{UO_2} = \Sigma_f^{U^{235}} = 0,261 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_s^{UO_2} = \Sigma_s^{U^{235}} + \Sigma_s^{U^{238}} + \Sigma_s^{O_2} = 0,00918 + 0,22 + 0,183 = 0,412 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_{tr}^{UO_2} = \Sigma_{tr}^{U^{235}} + \Sigma_{tr}^{U^{238}} + \Sigma_{tr}^{O_2} = 0,315 + 0,260 + 0,176 = 0,751 \text{ см}^{-1}.$$

Логарифмический декремент замедления и замедляющая способность находятся по формулам, представленным ниже:

$$\xi = \frac{2}{A + \frac{2}{3}}; \quad (3.1.5)$$

$$\xi \Sigma_s = \frac{2}{A + \frac{2}{3}} \cdot \Sigma_s, \text{ см}^{-1}. \quad (3.1.6)$$

Логарифмический декремент замедления и замедляющая способность для U^{235} :

$$\xi^{U^{235}} = \frac{2}{235 + \frac{2}{3}} = 8,49 \cdot 10^{-3};$$

$$\xi \Sigma_s^{U^{235}} = 8,49 \cdot 10^{-3} \cdot 9,18 \cdot 10^{-3} = 7,79 \cdot 10^{-5} \text{ см}^{-1}.$$

Логарифмический декремент замедления и замедляющая способность для U^{238} :

$$\xi^{U^{238}} = \frac{2}{238 + \frac{2}{3}} = 8,38 \cdot 10^{-3};$$

$$\xi \Sigma_s^{U^{238}} = 8,38 \cdot 10^{-3} \cdot 0,22 = 1,84 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}.$$

Логарифмический декремент замедления и замедляющая способность для O_2 :

$$\xi^{O_2} = \frac{2}{16 + \frac{2}{3}} = 0,12;$$

$$\xi \Sigma_s^{O_2} = 0,12 \cdot 0,183 = 2,2 \cdot 10^{-2} \text{ см}^{-1}.$$

Логарифмический декремент замедления и замедляющая способность для UO_2 :

$$\xi^{UO_2} = \frac{\sum \xi \Sigma}{\sum \Sigma} = \frac{\xi \Sigma^{U^{235}} + \xi \Sigma^{U^{238}} + \xi \Sigma^{O_2}}{\Sigma_s^{U^{235}} + \Sigma_s^{U^{238}} + \Sigma_s^{O_2}} = \frac{7,79 \cdot 10^{-5} + 1,84 \cdot 10^{-3} + 2,2 \cdot 10^{-2}}{9,18 \cdot 10^{-3} + 0,22 + 0,183} = 5,80 \cdot 10^{-2};$$

$$\xi \Sigma_s^{UO_2} = 5,80 \cdot 10^{-2} \cdot 0,412 = 2,39 \cdot 10^{-2} \text{ см}^{-1}.$$

3.2 Гомогенизация

Реальная ячейка, содержащая замедлитель, сборку твэл, теплоноситель, оболочку канала, заменяется эквивалентной-двухзонной в которой имеется гомогенизированный блок замедлителя и фиктивный блок, образованный путем гомогенизации всего содержимого канала (ядерное горючее, конструкционные материалы, теплоноситель). На рисунке 3.2.1 представлены способ приведения многозонной ячейки к двухзонной.

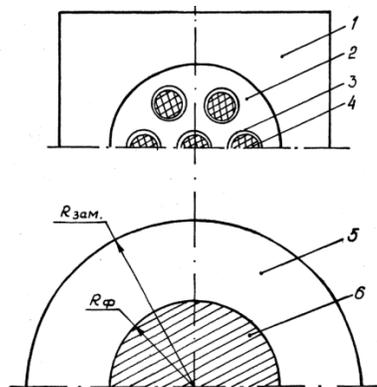


Рисунок 3.2.1 – Способ приведения многозонной ячейки к двухзонной:

1–замедлитель; 2 – теплоноситель; 3– оболочка твэл; 4–твэл; 5– блок замедлителя;
5– фиктивный блок

Необходимо определить площади, занимаемые компонентами для дальнейшего вычисления коэффициента размножения в бесконечной среде:

$$S_{\phi} = \pi \cdot \frac{D_{кан}^2}{4} = 3,14 \cdot \frac{8,4^2}{4} = 60,79 \text{ см}^2;$$

$$S_{зам} = S_{яч} - S_{ф} = 625 - 60,79 = 564,21 \text{ см}^2;$$

$$S_{тон} = \pi \cdot R_{ят}^2 \cdot n = 3,14 \cdot (1,17 / 2)^2 \cdot 18 = 19,34 \text{ см}^2;$$

$$S_{км} = \pi \cdot (R_{внеш.т.к.}^2 - R_{внут.т.к.}^2) + \pi \cdot (R_{внеш.твэл}^2 - R_{внут.твэл}^2) \cdot n = \\ = 3,14 \cdot (4,4^2 - 4,2^2) + 3,14 \cdot (0,68^2 - 0,585^2) \cdot 18 = 13,65 \text{ см}^2;$$

$$S_{мен} = \pi \cdot (R_{внутр.т.к.}^2 - n \cdot R_{внеш.твэл}^2) = 29,25 \text{ см}^2.$$

Макроскопические сечения с учетом гомогенизации 1-го рода рассчитываются по формуле:

$$\Sigma_i^{\Gamma 1} = \Sigma_i \frac{S_i}{S_{яч}}. \quad (3.2.1)$$

Макроскопические сечения с учетом гомогенизации 2-го рода (фиктивный блок) рассчитываются по формуле:

$$\Sigma_i^{\Gamma 2} = \Sigma_i \frac{S_i}{S_{ф}}. \quad (3.2.2)$$

Результаты расчеты макроскопических сечений с учетом гомогенизаций представлены в таблицах Б.1 и Б.2 в Приложении Б.

3.3 Расчет коэффициента размножения в бесконечной среде

Коэффициент размножения для бесконечной среды определяется формулой четырех сомножителей:

$$k_{\infty} = \varphi \cdot \mu \cdot \theta \cdot \eta, \quad (3.3.1)$$

где φ – вероятность избежать резонансного захвата;

μ – коэффициент размножения на быстрых нейтронах;

θ – коэффициент использования тепловых нейтронов;

η – число вторичных нейтронов на один поглощенный в топливе.

3.3.1 Вероятность избежать резонансного захвата

Резонансный захват нейтронов происходит ядрами U^{238} . Вероятность избежать нейтронами резонансного захвата рассчитывается по формуле:

$$\varphi = \exp\left(-\frac{k_T \cdot R_{UO_2} \cdot \sqrt{R_{\text{блока}} \cdot n \cdot \mu_1} + 0,73 \cdot n \cdot R_{UO_2}^2 \cdot \mu_1}{\xi \Sigma_{s_{зам}} \cdot S_{зам} + \xi \Sigma_{s_{\phi}} \cdot S_{\phi}}\right) \cdot \frac{\Sigma_{a_U}}{\Sigma_{a_{\phi.б.}}}, \quad (3.3.1.1)$$

где k_T – температурный коэффициент;

μ_1 – пористость по U^{238} .

Температурный коэффициент рассчитывается по формуле:

$$k_T = 0,775 \cdot (1 + 0,0175 \cdot \sqrt{T_U}), \quad (3.3.1.2)$$

где T_U – температура топлива.

Пористость по U^{238} определяется следующим образом:

$$\mu_1 = \frac{N^{U^{238}}}{N_0^{U^{238}}}, \quad (3.3.1.3)$$

где $N_0^{U^{238}}$ – концентрация U^{238} в природном уране;

$N^{U^{238}}$ – концентрация U^{238} в топливе.

Температурный коэффициент:

$$k_T = 0,775 \cdot (1 + 0,0175 \cdot \sqrt{293}) = 1,0072.$$

Пористость по U^{238} :

$$\mu_1 = \frac{2,39 \cdot 10^{22} \cdot 238}{6,023 \cdot 10^{23} \cdot 0,993 \cdot 19,05} = 0,499.$$

Тогда вероятность избежать резонансного захвата:

$$\varphi = \exp\left(-\frac{1,0072 \cdot 0,585 \cdot \sqrt{4,2 \cdot 18 \cdot 0,499} + 0,73 \cdot 18 \cdot 0,585^2 \cdot 0,499}{0,06146 \cdot 564,21 + 0,009588 \cdot 60,79}\right) = 0,847.$$

3.3.2 Коэффициент размножения на быстрых нейтронах

Величина μ в гетерогенном реакторе зависит от формы, размеров и расположения топливного блока, а также от диффузионных свойств топливного блока. При расчете μ для стержневых ТВЭЛ можно воспользоваться формулой:

$$\mu = 1 + \frac{0,092 \cdot P}{1 - 0,52 \cdot P}; \quad (3.3.2.1)$$

где P – вероятность того, что быстрый нейтрон испытывает какое-либо столкновение с ядром U^{238} ;

Значение P определяется по рисунку 3.3.2.1:

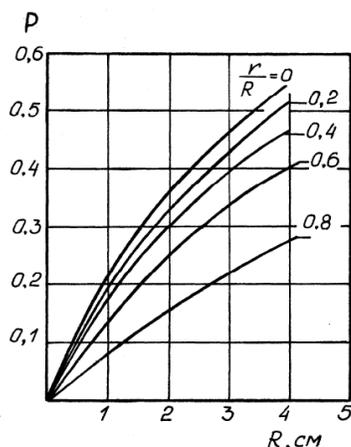


Рисунок 3.3.2.1 – График вероятности столкновения быстрого нейтрона с ядром U^{238}

При соотношении $\frac{r}{R} = 0,46$ и радиусе топлива 0,9 см, величина $P=0,1$.

Тогда коэффициент размножения на быстрых нейтронах:

$$\mu = 1 + \frac{0,092 \cdot 0,1}{1 - 0,52 \cdot 0,1} = 1,005.$$

3.3.3 Коэффициент использования тепловых нейтронов

Расчет θ пройдет в два этапа. Сначала определяется величина θ'_ϕ – отношение числа тепловых нейтронов, поглощенных в фиктивном блоке, к общему числу поглощенных тепловых нейтронов. Затем определяется θ_0 – коэффициент использования тепловых нейтронов внутри фиктивного блока:

$$\theta_0 = \frac{\Sigma_{a_{мон}}}{\Sigma_{a_\phi}}. \quad (3.3.3.1)$$

Величина отношения числа тепловых нейтронов, поглощенных в фиктивном блоке определяется по формуле:

$$\frac{1}{\theta'_\phi} = 1 + F \cdot \frac{S_{зам} \cdot \Sigma_{a_{зам}}}{S_\phi \cdot \Sigma_{a_\phi}} + (E - 1), \quad (3.3.3.2)$$

где F – коэффициент экранирования;

$(E - 1)$ – фактор, учитывающий избыточное поглощение нейтронов в замедлителе;

Для цилиндрического уранового стержня коэффициент экранирования равен:

$$F = \frac{1}{2} \cdot \frac{R_\phi}{L_\phi} \cdot \frac{I_0\left(\frac{R_\phi}{L_\phi}\right)}{I_1\left(\frac{R_\phi}{L_\phi}\right)}, \quad (3.3.3.3)$$

где I_0 и I_1 – модифицированные функции Бесселя нулевого и первого порядков;

L_ϕ – длина диффузии в фиктивном блоке;

Фактор, учитывающий избыточное поглощение нейтронов в замедлителе:

$$(E - 1) = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{R_{зам}}{L_{зам}}\right)^2 \cdot \left(\ln \frac{R_{зам}}{L_\phi} - 0,75\right). \quad (3.3.3.4)$$

Длина диффузии определяется по формуле:

$$L_{diff} = \sqrt{\frac{1}{3\Sigma_{tr} \cdot \Sigma_a}}. \quad (3.3.3.5)$$

Тогда длина диффузии в фиктивном блоке и блоке замедлителя:

$$L_{\phi} = \sqrt{\frac{1}{3\Sigma_{tr\phi} \cdot \Sigma_{a\phi}}} = \sqrt{\frac{1}{3 \cdot 1,41 \cdot 0,125}} = 1,37 \text{ см};$$

$$L_{зам} = \sqrt{\frac{1}{3\Sigma_{trзам} \cdot \Sigma_{aзам}}} = \sqrt{\frac{1}{3 \cdot 0,00025 \cdot 0,366}} = 60,004 \text{ см}.$$

Фактор, учитывающий избыточное поглощение нейтронов в замедлителе:

$$(E-1) = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{R_{зам}}{L_{зам}} \right)^2 \cdot \left(\ln \frac{R_{зам}}{L_{\phi}} - 0,75 \right) = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{14,12}{60} \right)^2 \cdot \left(\ln \frac{14,12}{4,4} - 0,75 \right) = 0,0115.$$

Коэффициент экранирования:

$$F = \frac{1}{2} \cdot \frac{R_{\phi}}{L_{\phi}} \cdot \frac{I_0\left(\frac{R_{\phi}}{L_{\phi}}\right)}{I_1\left(\frac{R_{\phi}}{L_{\phi}}\right)} = \frac{1}{2} \cdot \frac{4,4}{1,374} \cdot \frac{I_0\left(\frac{4,4}{1,374}\right)}{I_1\left(\frac{4,4}{1,374}\right)} = 1,943.$$

Тогда величина отношения числа тепловых нейтронов, поглощенных в фиктивном блоке:

$$\frac{1}{\theta'_{\phi}} = 1 + F \cdot \frac{S_{зам} \cdot \Sigma_{aзам}}{S_{\phi} \cdot \Sigma_{a\phi}} + (E-1) = 1 + 1,9433 \cdot \frac{564,21 \cdot 2 \cdot 10^{-4}}{60,79 \cdot 0,125} + 0,01148 = 1,048;$$

$$\theta'_{\phi} = 0,954.$$

Коэффициент использования тепловых нейтронов внутри фиктивного блока:

$$\theta_0 = \frac{\Sigma_{aмон}}{\Sigma_{a\phi}} = \frac{6,869}{7,598} = 0,904.$$

Тогда коэффициент использования тепловых нейтронов:

$$\theta = \theta_0 \cdot \theta'_\phi = 0,904 \cdot 0,954 = 0,863.$$

3.3.4 Число вторичных нейтронов на один поглощенный в топливе

η показывает число вторичных нейтронов, приходящихся на один тепловой нейтрон, поглощенный топливом и вызвавший деление. Рассчитывается по формуле:

$$\eta = \nu_f \cdot \frac{\sum_{f_{mon}}}{\sum_{a_{mon}}}, \quad (3.3.4.1)$$

где ν_f – число нейтронов, которое испускается при акте деления

Тогда:

$$\eta = \nu_f \cdot \frac{\sum_{f_{mon}}}{\sum_{a_{mon}}} = 2,42 \cdot \frac{0,0081}{0,0110} = 1,776.$$

Тогда коэффициент размножения в бесконечной среде:

$$k_\infty = \mu \cdot \varphi \cdot \theta \cdot \eta = 1,005 \cdot 0,847 \cdot 0,863 \cdot 1,776 = 1,304.$$

3.4 Расчет эффективного коэффициента размножения

Эффективный коэффициент размножения нейтронов находится по формуле:

$$k_{эфф} = k_\infty \cdot P = k_\infty \cdot \frac{\exp(-B^2 \tau_p)}{1 + B^2 L_p^2}, \quad (3.4.1)$$

где B^2 – геометрический параметр;

τ_p – возраст нейтронов;

P – вероятность избежать утечки.

Квадрат длины диффузии с учетом всех элементов ячейки:

$$L^2 = L_{зам}^2 \cdot \frac{\left(1 + \frac{S_\phi}{S_{зам}} \cdot \frac{1}{F}\right) \cdot S_{яч}}{\left(1 + \frac{S_\phi}{S_{зам}} \cdot \frac{\Sigma_{tr}^\phi}{\Sigma_{tr}^{зам}}\right) \cdot S_{зам}} \cdot (1 - \theta'_\phi). \quad (3.4.2)$$

Возраст нейтронов с учётом всех элементов ячейки:

$$\tau_p = \tau_{зам} \left(\frac{S_{яч}}{S_{зам}}\right)^2. \quad (3.4.3)$$

Геометрический параметр:

$$B^2 = \left(\frac{\pi}{H + 2 \cdot \delta}\right)^2 + \left(\frac{2,405}{R + \delta}\right)^2, \quad (3.4.4)$$

где δ – эффективная добавка за счет отражателя.

Эффективная добавка за счет отражателя:

$$\delta = 1,2 \cdot L_{отр} \cdot th \frac{T}{L_{отр}}, \quad (3.4.5)$$

где T – толщина отражателя.

Толщина отражателя:

$$T = 1,5 \cdot M, \quad (3.4.6)$$

где M – длина миграции нейтронов в отражателе.

Длина миграции:

$$M = \sqrt{L^2 + \tau}. \quad (3.4.7)$$

Тогда квадрат длины диффузии отражателя:

$$L^2 = L_{зам}^2 \cdot \frac{\left(1 + \frac{S_\phi}{S_{зам}} \cdot \frac{1}{F}\right) \cdot S_{яч}}{\left(1 + \frac{S_\phi}{S_{зам}} \cdot \frac{\Sigma_{tr}^\phi}{\Sigma_{tr}^{зам}}\right) \cdot S_{зам}} \cdot (1 - \theta'_\phi) =$$

$$= 60^2 \cdot \frac{\left(1 + \frac{60,79}{564,21} \cdot \frac{1}{1,943}\right) \cdot 625}{\left(1 + \frac{60,79}{564,21} \cdot \frac{1,413}{0,366}\right) \cdot 564,21} \cdot (1 - 0,954) = 136,097 \text{ см}^2.$$

Возраст нейтронов:

$$\tau_p = \tau_{зам} \left(\frac{S_{яч}}{S_{зам}}\right)^2 = 352 \cdot \left(\frac{625}{564,21}\right)^2 = 431,94 \text{ см}^2.$$

Длина миграции:

$$M = 62,87 \text{ см.}$$

Толщина отражателя:

$$T = 1,5 \cdot M = 1,5 \cdot 62,87 = 94,304 \text{ см.}$$

Тогда эффективная добавка за счет отражателя:

$$\delta = 1,2 \cdot L_{отр} \cdot th \frac{T}{L_{отр}} = 1,2 \cdot 60 \cdot th \frac{94,304}{60} = 66,05 \text{ см.}$$

Геометрический параметр:

$$B^2 = \left(\frac{\pi}{H + 2 \cdot \delta}\right)^2 + \left(\frac{2,405}{R + \delta}\right)^2 = \left(\frac{\pi}{918,80}\right)^2 + \left(\frac{2,405}{627,98}\right)^2 = 2,63 \cdot 10^{-5}.$$

Тогда эффективный коэффициент размножения:

$$k_{эфф} = k_{\infty} \cdot \frac{\exp(-B^2 \tau_p)}{1 + B^2 L_p^2} = 1,30 \cdot \frac{\exp(-2,63 \cdot 10^{-5} \cdot 431,94)}{1 + 2,63 \cdot 10^{-5} \cdot 136,09} = 1,28.$$

3.5 Оптимизация

В процессе оптимизации будут варьироваться различные параметры ядерного реактора, а именно: размер ячейки, диаметр канала и диаметр твэла. Делается это с целью максимального увеличения коэффициента размножения в бесконечной среде в допустимом диапазоне (скорость прокачки теплоносителя не должна превышать 10 м/с.

Значения коэффициента размножения в бесконечной среде и скорости прокачки теплоносителя при изменении размера ячейки представлены в таблице 3.5.1 и на рисунке 3.5.1.

Таблица 3.5.1 – Зависимость коэффициента размножения в бесконечной среде и скорости теплоносителя от размера ячейки

Размер ячейки, см	Коэффициент размножения в бесконечной среде	Скорость теплоносителя, м/с
25	1,304	5,216
26	1,315	5,642
27	1,323	6,08436
28	1,33	6,543
29	1,334	7,019
30	1,337	7,512
31	1,339	8,021
32	1,339	8,546
33	1,338	9,089
34	1,336	9,648

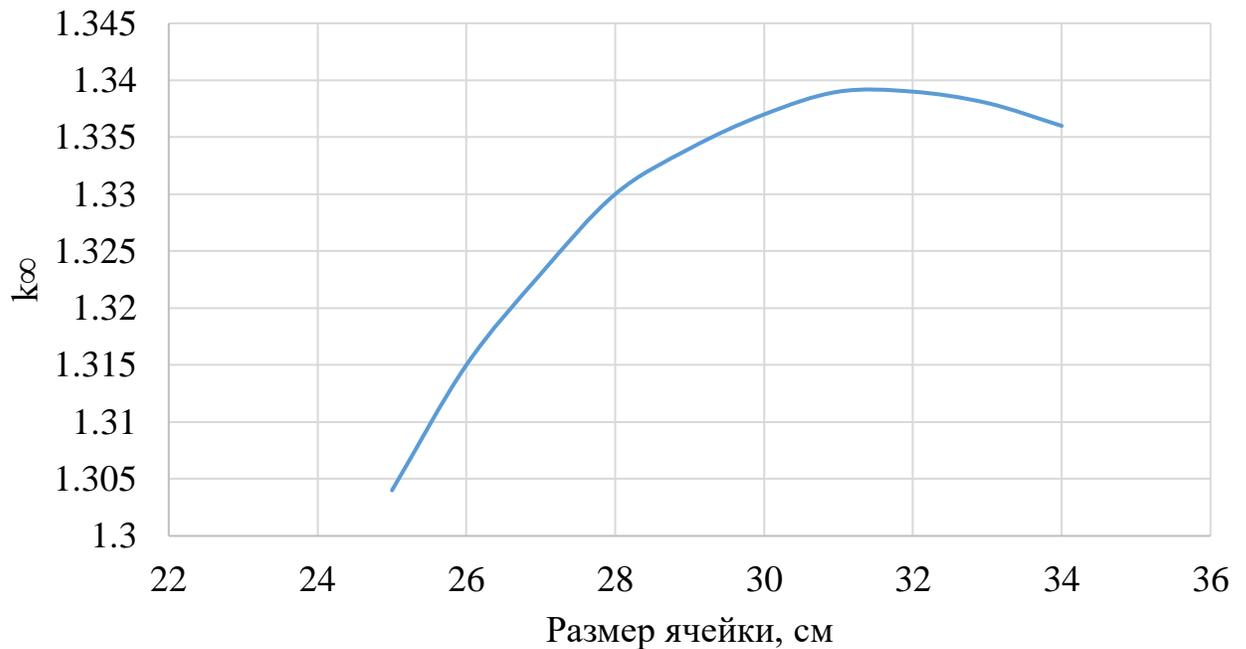


Рисунок 3.5.1 – Зависимость коэффициента размножения в бесконечной среде и скорости теплоносителя от размера ячейки

Исходя из результатов, наибольшее значение коэффициента размножения в бесконечной среде соответствует размеру ячейки 31-32 см. Скорость теплоносителя в данном случае 8-8,5 м/с и не превышает установленный предел. Последующее увеличение размера ячейки не имеет смысла, так как оно приводит к уменьшению коэффициента размножения и увеличению скорости прокачки теплоносителя.

Значения коэффициента размножения в бесконечной среде и скорости течения теплоносителя при изменении размера канала представлены в таблице 3.5.2 и на рисунке 3.5.2.

Таблица 3.5.2 – Зависимость коэффициента размножения в бесконечной среде и скорости теплоносителя от размера канала

Диаметр канала, см	Коэффициент размножения в бесконечной среде	Скорость теплоносителя, м/с
8,4	1,304	5,216
8,3	1,309	5,474
8,2	1,313	5,756
8,1	1,318	6,064
8	1,323	6,402
7,9	1,327	6,775
7,8	1,332	7,189
7,7	1,337	7,651
7,6	1,341	8,168
7,5	1,346	8,753
7,4	1,351	9,418

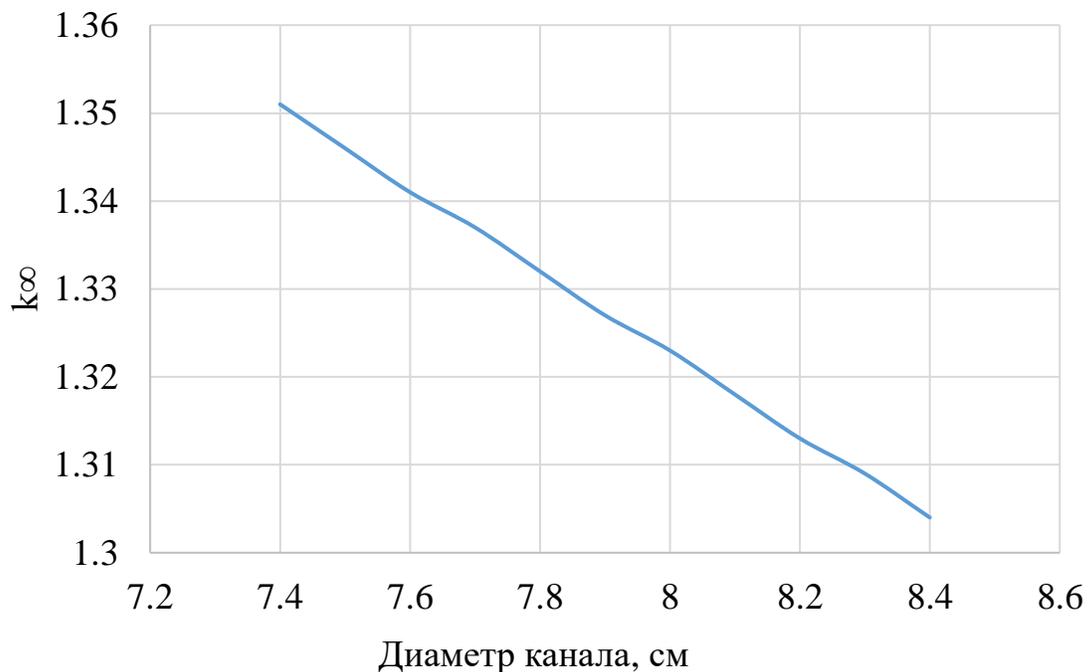


Рисунок 3.5.2 – Зависимость коэффициента размножения в бесконечной среде и скорости теплоносителя от размера канала

Наблюдается линейная зависимость коэффициента размножения в бесконечной среде от размера топливного канала. При увеличении размера канала происходит уменьшение коэффициента, при уменьшении – рост. Максимальное значение коэффициента размножения (1,351) наблюдается при диаметре канала 7,4 см, дальнейшее увеличение приведет к выходу скорости прокачки теплоносителя из допустимого диапазона.

Значения коэффициента размножения в бесконечной среде и скорости течения теплоносителя при изменении радиуса твэла представлены в таблице 3.5.3 и на рисунке 3.5.3.

Таблица 3.5.3 – Зависимость коэффициента размножения в бесконечной среде и скорости теплоносителя от радиуса твэла

Диаметр твэла, см	Коэффициент размножения в бесконечной среде	Скорость теплоносителя, м/с
1,36	1,304	5,216
1,41	1,31	5,635
1,46	1,316	6,146
1,51	1,322	6,783
1,56	1,328	7,596
1,61	1,335	8,669
1,65	1,341	9,81

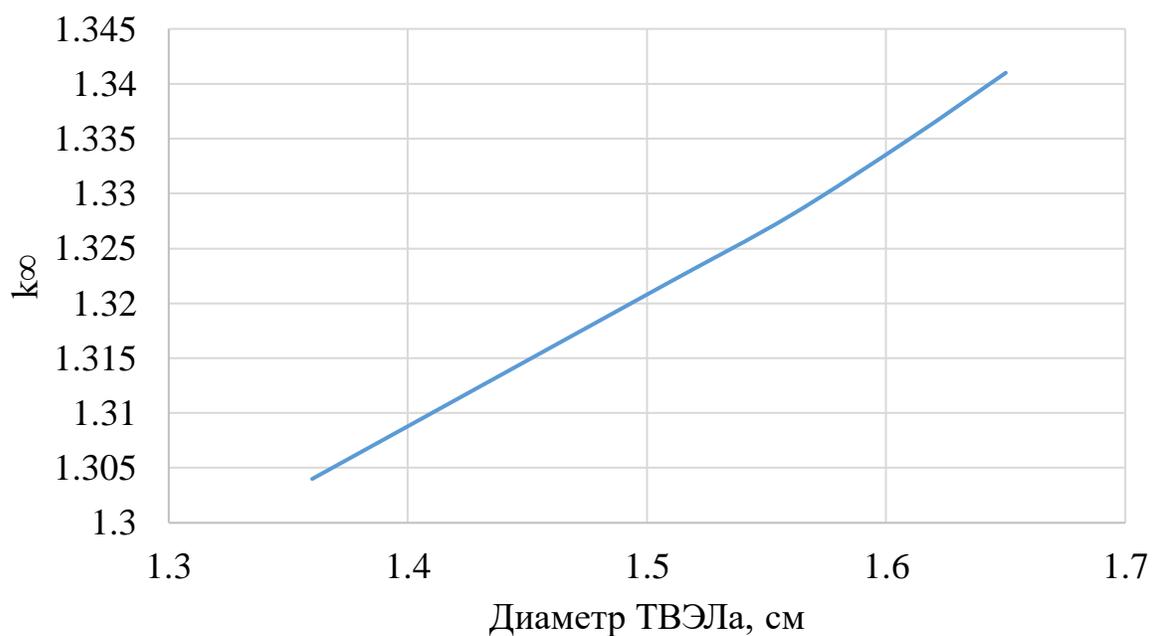


Рисунок 3.5.1 – Зависимость коэффициента размножения в бесконечной среде и скорости теплоносителя от радиуса твэла

Наибольшее значение коэффициента размножения (1,341), при котором скорость теплоносителя остается в допустимых рамках, достигается при диаметре твэла 1,65 см.

Затем все три параметра варьировались одновременно друг с другом, и было получено максимальное значение коэффициента размножения - 1,366. Размер ячейки составил 29 см, диаметр канала – 7,68 см, диаметр твэла 1,34 см, а скорость прокачки теплоносителя не превысила 10 м/с и получилась равной 9,998 м/с.

Заключение

В представленной работе был произведен нейтронно-физический расчет графито-водного ядерного реактора. Сам расчет включал в себя предварительный расчет, в котором были посчитаны размеры активной зоны реактора и скорость прокачки теплоносителя, которая составила 5,22 м/с, что соответствует нормам безопасности для реакторов с водным теплоносителем. Были рассчитаны ядерно-физические характеристики «холодного» реактора (микро и макросечения).

Одним из последних этапов был рассчитан коэффициент размножения в бесконечной среде с помощью формулы 4 сомножителей, который составил 1,304. Эффективный коэффициент размножения получился равен 1,285.

Самой последней стадией представленной работы стала оптимизация ядерного реактора. В процессе оптимизации менялись три параметра: размер ячейки, диаметр топливного канала и диаметр твэла. Были построены оптимизационные кривые, для изменения каждого из параметров, чтобы посмотреть зависимость изменения коэффициента размножения в бесконечной среде от изменения выбранного параметра, а также чтобы достичь максимально возможного коэффициента размножения и не превысить допустимую скорость прокачки теплоносителя. В итоге было установлено, что при размере ячейки в 29 см, диаметре канала – 7,68 см и диаметре твэла – 1,34 см будет достигнут максимум коэффициента размножения в бесконечной среде – 1,366, скорость прокачки теплоносителя при этом составила – 9,998 м/с, что удовлетворяет допустимым требованиям.

Список использованных источников

1. История атомной энергетики Советского Союза и России. Вып. 3. История РБМК. Под ред. Сидоренко В. А. — М.: ИздАТ, 2003.. Электронная библиотека «История Росатома»
2. Нигматулин И. Н., Нигматулин Б. И., Ядерные энергетические установки. Учебник для ВУЗов. М.: Энергоатомиздат, 1986.
3. Андрюшин И. А., Чернышёв А. К., Юдин Ю. А. Укрощение ядра. Страницы истории ядерного оружия и ядерной инфраструктуры СССР. — Саров, 2003. — 481 с. — ISBN 5 7493 0621 6.
4. Абагян Л.П. Групповые константы для расчета ядерных реакторов и защиты: Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1981.
5. Бойко В.И. и др. Нейтронно-физический и теплогидравлический расчет реактора на тепловых нейтронах: Учебное пособие /Бойко В.И., Кошелев Ф.П., Шаманин И.В., Колпаков Г.Н. – Томск: Томский государственный университет, 2002.
6. 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.

Приложение А

(обязательное)

Таблица А.1 – Микроскопические и макроскопические сечения и замедляющие способности материалов

Материал	Величина												
	$\sigma_a, б$	$\sigma_c, б$	$\sigma_f, б$	$\sigma_s, б$	μ_s	$\sigma_{tr}, б$	$\Sigma_a, см^{-1}$	$\Sigma_c, см^{-1}$	$\Sigma_f, см^{-1}$	$\Sigma_s, см^{-1}$	$\Sigma_{tr}, см^{-1}$	ξ	$\xi\Sigma_s, см^{-1}$
UO ₂	–	–	–	–	–	–	0,356	0,082	0,261	0,412	0,751	0,058	0,024
U ²³⁵	499,780	101,000	425,880	15,00	0,000	514,780	0,306	0,068	0,261	0,009	0,315	0,008	$7,790 \cdot 10^{-5}$
U ²³⁸	2,070	2,710	–	9,000	0,000	11,070	0,049	0,021	–	0,220	0,260	0,008	0,002
Отоп	–	–	–	3,75	0,040	3,60	–	–	–	0,183	0,176	0,120	0,022
H ₂ O	–	–	–	–	–	–	0,022	0,022	–	2,670	2,310	0,506	1,350
Н	0,253	0,332	–	20,300	0,667	7,013	0,022	0,022	–	1,359	0,475	1,200	1,630
Отепл	–	–	–	3,75	0,040	3,60	–	–	–	0,125	0,120	0,120	0,015
С	0,003	0,004	–	4,700	0,060	4,421	$3,313 \cdot 10^{-4}$	$3,313 \cdot 10^{-4}$	–	0,389	0,366	0,158	0,061
Zr	0,141	0,185	–	6,200	0,010	6,279	0,008	0,008	–	0,266	0,272	0,022	0,006

Приложение Б

(обязательное)

Таблица Б.1 – Макроскопические сечения элементов и замедляющие способности материалов после гомогенизации для фиктивного блока

Материал	Величина						
	$\Sigma_a, \text{см}^{-1}$	$\Sigma_c, \text{см}^{-1}$	$\Sigma_f, \text{см}^{-1}$	$\Sigma_s, \text{см}^{-1}$	$\Sigma_{tr}, \text{см}^{-1}$	ξ	$\xi\Sigma_s, \text{см}^{-1}$
UO ₂	0,113	0,040	0,083	0,129	0,240	0,137	0,018
U ²³⁵	0,097	0,019	0,083	0,003	0,100	0,008	$2,477 \cdot 10^{-5}$
U ²³⁸	0,016	0,021	–	0,068	0,084	0,008	$5,726 \cdot 10^{-4}$
O _{топ}	–	–	–	0,058	0,056	0,120	0,007
H ₂ O	0,022	0,022	–	2,670	2,310	0,506	1,350
H	0,008	0,011	–	0,654	0,001	1,200	0,785
O _{тепл}	–	–	–	0,060	0,058	0,120	0,007
C	$2,529 \cdot 10^{-4}$	$3,312 \cdot 10^{-4}$	–	0,389	0,366	0,158	0,061
Zr	0,001	0,002	–	0,059	0,061	0,022	0,001

Таблица Б.2 – Макроскопические сечения элементов и замедляющие способности материалов для гомогенной смеси

Материал	Величина						
	$\Sigma_a, \text{см}^{-1}$	$\Sigma_c, \text{см}^{-1}$	$\Sigma_f, \text{см}^{-1}$	$\Sigma_s, \text{см}^{-1}$	$\Sigma_{tr}, \text{см}^{-1}$	ξ	$\xi\Sigma_s, \text{см}^{-1}$
UO ₂	0,011	0,004	0,008	0,013	0,023	0,137	0,002
U ²³⁵	0,009	0,019	0,008	$2,840 \cdot 10^{-4}$	0,009	0,008	$2,410 \cdot 10^{-6}$
U ²³⁸	0,001	0,020	–	0,007	0,008	0,008	$5,569 \cdot 10^{-5}$
O _{топ}	–	–	–	0,006	0,005	0,120	0,001
H ₂ O	0,022	0,022	–	2,670	2,310	0,506	1,350
H	$7,938 \cdot 10^{-4}$	0,001	–	0,064	0,022	1,200	0,076
O _{тепл}	–	–	–	0,006	0,006	0,120	$7,000 \cdot 10^{-4}$
C	$2,283 \cdot 10^{-4}$	$2,990 \cdot 10^{-4}$	–	0,351	0,331	0,158	0,055
Zr	$1,324 \cdot 10^{-4}$	$1,735 \cdot 10^{-4}$	–	0,006	0,006	0,022	$1,267 \cdot 10^{-4}$