

**Министерство образования и науки Российской Федерации**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования

**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт Физико-технический

Направление подготовки 14.03.02 Ядерная физика и технологии

Кафедра Физико-энергетические установки

**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

| Тема работы                                                        |
|--------------------------------------------------------------------|
| <b>НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА<br/>ТИПА ВВЭР</b> |

УДК 621.039.536

Студент

| Группа | ФИО                       | Подпись | Дата |
|--------|---------------------------|---------|------|
| 0A2B   | Кузьмин Василий Сергеевич |         |      |

Руководитель

| Должность                            | ФИО          | Ученая степень,<br>звание | Подпись | Дата |
|--------------------------------------|--------------|---------------------------|---------|------|
| Старший<br>преподаватель<br>каф. ФЭУ | А.О. Семенов | —                         |         |      |

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

| Должность               | ФИО         | Ученая степень,<br>звание | Подпись | Дата |
|-------------------------|-------------|---------------------------|---------|------|
| Доцент каф. МЕН<br>ИСГТ | А.А. Сечина | К.Х.Н.                    |         |      |

По разделу «Социальная ответственность»

| Должность         | ФИО           | Ученая степень,<br>звание | Подпись | Дата |
|-------------------|---------------|---------------------------|---------|------|
| Ассистент каф. ПФ | Т.С. Гоголева | к.ф.-м.н.                 |         |      |

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

| Зав. кафедрой | ФИО           | Ученая степень,<br>звание | Подпись | Дата |
|---------------|---------------|---------------------------|---------|------|
| ФЭУ ФТИ       | О.Ю. Долматов | к.ф.-м.н.,<br>доцент      |         |      |

Томск – 2016 г.

## ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ООП

| Код<br>результата                 | Результат обучения<br>(выпускник должен быть готов)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|-----------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Общекультурные компетенции</b> |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Р1                                | Демонстрировать культуру мышления, способность к обобщению, анализу, восприятию информации, постановке цели и выбору путей ее достижения; стремления к саморазвитию, повышению своей квалификации и мастерства; владение основными методами, способами и средствами получения, хранения, переработки информации, навыки работы с компьютером как средством управления информацией; способность работы с информацией в глобальных компьютерных сетях.                |
| Р2                                | Способность логически верно, аргументировано и ясно строить устную и письменную речь; критически оценивать свои достоинства и недостатки, намечать пути и выбирать средства развития достоинств и устранения недостатков.                                                                                                                                                                                                                                           |
| Р3                                | Готовностью к кооперации с коллегами, работе в коллективе; к организации работы малых коллективов исполнителей, планированию работы персонала и фондов оплаты труда; генерировать организационно-управленческих решения в нестандартных ситуациях и нести за них ответственность; к разработке оперативных планов работы первичных производственных подразделений; осуществлению и анализу исследовательской и технологической деятельности как объекта управления. |
| Р4                                | Умение использовать нормативные правовые документы в своей деятельности; использовать основные положения и методы социальных, гуманитарных и экономических наук при решении социальных и профессиональных задач, анализировать социально-значимые проблемы и процессы; осознавать социальную значимость своей будущей профессии, обладать высокой мотивацией к выполнению профессиональной деятельности.                                                            |
| Р5                                | Владеть одним из иностранных языков на уровне не ниже разговорного.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Р6                                | Владеть средствами самостоятельного, методически правильного использования методов физического воспитания и укрепления здоровья, готов к достижению должного уровня физической подготовленности для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности.                                                                                                                                                                                             |

| <b>Код<br/>результата</b>           | <b>Результат обучения<br/>(выпускник должен быть готов)</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|-------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Профессиональные компетенции</b> |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Р7                                  | Использовать основные законы естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности, применять методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| Р8                                  | Владеть основными методами защиты производственного персонала и населения от возможных последствий аварий, катастроф, стихийных бедствий; И быть готовым к оценке ядерной и радиационной безопасности, к оценке воздействия на окружающую среду, к контролю за соблюдением экологической безопасности, техники безопасности, норм и правил производственной санитарии, пожарной, радиационной и ядерной безопасности, норм охраны труда; к контролю соответствия разрабатываемых проектов и технической документации стандартам, техническим условиям, требованиям безопасности и другим нормативным документам; за соблюдением технологической дисциплины и обслуживанию технологического оборудования; и к организации защиты объектов интеллектуальной собственности и результатов исследований и разработок как коммерческой тайны предприятия; и понимать сущность и значение информации в развитии современного информационного общества, сознавать опасности и угрозы, возникающие в этом процессе, соблюдать основные требования информационной безопасности, в том числе защиты государственной тайны). |
| Р9                                  | Уметь производить расчет и проектирование деталей и узлов приборов и установок в соответствии с техническим заданием с использованием стандартных средств автоматизации проектирования; разрабатывать проектную и рабочую техническую документацию, оформление законченных проектно-конструкторских работ; проводить предварительного технико-экономического обоснования проектных расчетов установок и приборов.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| Р10                                 | Готовность к эксплуатации современного физического оборудования и приборов, к освоению технологических процессов в ходе подготовки производства новых материалов, приборов, установок и систем; к наладке, настройке, регулировке и опытной проверке оборудования и программных средств; к монтажу, наладке, испытанию и сдаче в эксплуатацию опытных образцов приборов, установок, узлов, систем и деталей.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |

| <b>Код<br/>результата</b> | <b>Результат обучения<br/>(выпускник должен быть готов)</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|---------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| P11                       | Способность к организации метрологического обеспечения технологических процессов, к использованию типовых методов контроля качества выпускаемой продукции; и к оценке инновационного потенциала новой продукции.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| P12                       | Способность использовать информационные технологии при разработке новых установок, материалов и приборов, к сбору и анализу информационных исходных данных для проектирования приборов и установок; технические средства для измерения основных параметров объектов исследования, к подготовке данных для составления обзоров, отчетов и научных публикаций; к составлению отчета по выполненному заданию, к участию во внедрении результатов исследований и разработок; и проведения математического моделирования процессов и объектов на базе стандартных пакетов автоматизированного проектирования и исследований. |
| P13                       | Уметь готовить исходные данные для выбора и обоснования научно-технических и организационных решений на основе экономического анализа; использовать научно-техническую информацию, отечественный и зарубежный опыт по тематике исследования, современные компьютерные технологии и базы данных в своей предметной области; и выполнять работы по стандартизации и подготовке к сертификации технических средств, систем, процессов, оборудования и материалов;                                                                                                                                                          |
| P14                       | Готовность к проведению физических экспериментов по заданной методике, составлению описания проводимых исследований и анализу результатов; анализу затрат и результатов деятельности производственных подразделений; к разработки способов применения ядерно-энергетических, плазменных, лазерных, СВЧ и мощных импульсных установок, электронных, нейтронных и протонных пучков, методов экспериментальной физики в решении технических, технологических и медицинских проблем.                                                                                                                                        |
| P15                       | Способность к приемке и освоению вводимого оборудования, составлению инструкций по эксплуатации оборудования и программ испытаний; к составлению технической документации (графиков работ, инструкций, планов, смет, заявок на материалы, оборудование), а также установленной отчетности по утвержденным формам; и к организации рабочих мест, их техническому оснащению, размещению технологического оборудования.                                                                                                                                                                                                    |

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

Институт Физико-технический  
 Направление подготовки 14.03.02 Ядерные физика и технологии  
 Кафедра Физико-энергетические установки

УТВЕРЖДАЮ:  
 Зав. кафедрой ФЭУ  
 \_\_\_\_\_  
 (Подпись) (Дата) **О.Ю. Долматов**  
 (Ф.И.О.)

**ЗАДАНИЕ**  
**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

|                                                                            |
|----------------------------------------------------------------------------|
| <b>Бакалаврской работы</b>                                                 |
| (бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации) |

Студенту:

| Группа | ФИО                         |
|--------|-----------------------------|
| 0A2B   | Кузьмину Василию Сергеевичу |

Тема работы:

|                                                                |
|----------------------------------------------------------------|
| <b>Нейтронно-физический расчет ядерного реактора типа ВВЭР</b> |
| Утверждена приказом директора (дата, номер) 18.02.2016 №1333/с |

|                                          |            |
|------------------------------------------|------------|
| Срок сдачи студентом выполненной работы: | 25.06.2016 |
|------------------------------------------|------------|

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Исходные данные к работе</b><br>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).        | - Тепловая мощность 175 [МВт]<br>- Ядерное горючее $UO_2$<br>- Обогащение урана 20 %<br>- Температура на входе 277 [°C]<br>- Температура на выходе 313 [°C]<br>- ТВЭЛы стержневые с наружным охлаждением<br>- Материалы оболочек ТВЭЛов и кассет хромоникелевый сплав |
| <b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b><br>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе). | - Нейтронно-физический расчет «холодного» реактора<br>- Нейтронно-физический расчет «горячего» реактора<br>- Многогрупповой расчет<br>- Свертка<br>- Расчёт нуклидного состава (в результате отравления, шлакования)                                                  |
| <b>Перечень графического материала</b><br>(с точным указанием обязательных чертежей)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | - Презентация<br>- Чертеж ячейки                                                                                                                                                                                                                                      |

| <b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b>            |                    |
|------------------------------------------------------------------------------|--------------------|
| <b>Раздел</b>                                                                | <b>Консультант</b> |
| Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение              | А.А. Сечина        |
| Социальная ответственность                                                   | Т.С. Гоголева      |
| <b>Названия разделов, которые должны быть написаны на иностранном языке:</b> |                    |
| нет                                                                          |                    |
|                                                                              |                    |
|                                                                              |                    |

|                                                                                                 |            |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b> | 16.05.2016 |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|

**Задание выдал руководитель:**

| <b>Должность</b>               | <b>ФИО</b>   | <b>Ученая степень, звание</b> | <b>Подпись</b> | <b>Дата</b> |
|--------------------------------|--------------|-------------------------------|----------------|-------------|
| Старший преподаватель каф. ФЭУ | А.О. Семенов | —                             |                | 16.05.2016  |

**Задание принял к исполнению студент:**

| <b>Группа</b> | <b>ФИО</b>                | <b>Подпись</b> | <b>Дата</b> |
|---------------|---------------------------|----------------|-------------|
| 0A2B          | Кузьмин Василий Сергеевич |                | 16.05.2016  |

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И  
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

| Группа | ФИО                         |
|--------|-----------------------------|
| 0A2B   | Кузьмину Василию Сергеевичу |

| Институт            | ФТ       | Кафедра                   | ФЭУ                                                                                  |
|---------------------|----------|---------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Уровень образования | Бакалавр | Направление/специальность | 14.03.02 Ядерные физика и технологии/<br>Ядерные реакторы и энергетические установки |

**Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:**

|                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих | Работа с информацией, представленной в российских и иностранных научных публикациях, аналитических материалах, статистических бюллетенях и изданиях, нормативно-правовых документах |
| 2. Нормы и нормативы расходования ресурсов                                                                                           |                                                                                                                                                                                     |
| 3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования                                  |                                                                                                                                                                                     |

**Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:**

|                                                                                                                                    |                                                                             |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| 1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения |                                                                             |
| 2. Планирование и формирование бюджета научных исследований                                                                        | Иерархическая структура работ<br>Календарный план-график реализации проекта |
| 3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования        |                                                                             |

**Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):**

|                                                                  |
|------------------------------------------------------------------|
| 1. Оценка конкурентоспособности технических решений              |
| 2. Матрица SWOT                                                  |
| 3. Альтернативы проведения НИ                                    |
| 4. График проведения и бюджет НИ                                 |
| 5. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИ |

|                                                      |  |
|------------------------------------------------------|--|
| Дата выдачи задания для раздела по линейному графику |  |
|------------------------------------------------------|--|

**Задание выдал консультант:**

| Должность            | ФИО         | Ученая степень, звание | Подпись | Дата       |
|----------------------|-------------|------------------------|---------|------------|
| Доцент каф. МЕН ИСГТ | А.А. Сечина | к.х.н.                 |         | 16.05.2016 |

**Задание принял к исполнению студент:**

| Группа | ФИО                       | Подпись | Дата       |
|--------|---------------------------|---------|------------|
| 0A2B   | Кузьмин Василий Сергеевич |         | 16.05.2016 |

# ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

| Группа | ФИО                         |
|--------|-----------------------------|
| 0A2B   | Кузьмину Василию Сергеевичу |

| Институт            | ФТ       | Кафедра                   | ФЭУ                                                                                  |
|---------------------|----------|---------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Уровень образования | Бакалавр | Направление/специальность | 14.03.02 Ядерные физика и технологии/<br>Ядерные реакторы и энергетические установки |

## Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

|                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|-------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. Описание рабочего места (рабочей зоны) на предмет возникновения:     | <ul style="list-style-type: none"> <li>– вредных факторов производственной среды: повышенный уровень электромагнитных полей, отклонение показателей макроклимата от оптимальных, ионизирующее излучение от ПЭВМ;</li> <li>– опасных факторов производственной среды: вероятность возникновения пожара, вероятность поражения электрическим током.</li> </ul> |
| 2. Знакомство и отбор законодательных и нормативных документов по теме: | <ul style="list-style-type: none"> <li>– электробезопасность;</li> <li>– пожарная безопасность;</li> <li>– требование охраны труда при работе с ПЭВМ.</li> </ul>                                                                                                                                                                                             |

## Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

|                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                                             |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности: | <ul style="list-style-type: none"> <li>– действие фактора на организм человека;</li> <li>– приведение допустимых норм с необходимой размерностью;</li> <li>– предлагаемые средства защиты.</li> </ul>                                       |
| 2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой произведённой среды в следующей последовательности:    | <ul style="list-style-type: none"> <li>– электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, средства защиты);</li> <li>– пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения).</li> </ul> |

## Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

| Должность             | ФИО           | Ученая степень, звание | Подпись | Дата       |
|-----------------------|---------------|------------------------|---------|------------|
| Ассистент каф. ПФ ФТИ | Т.С. Гоголева | к.ф.-м.н.              |         | 16.05.2016 |

Задание принял к исполнению студент:

| Группа | ФИО                       | Подпись | Дата       |
|--------|---------------------------|---------|------------|
| 0A2B   | Кузьмин Василий Сергеевич |         | 16.05.2016 |

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

Институт Физико-технический  
 Направление подготовки (специальность) 14.03.02 Ядерные физика и технологии  
 Уровень образования высшее  
 Кафедра Физико-энергетические установки  
 Период выполнения (весенний семестр 2015/2016 учебного года)

Форма представления работы:

Бакалаврская работа

**КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН**  
**выполнения выпускной квалификационной работы**

|                                          |            |
|------------------------------------------|------------|
| Срок сдачи студентом выполненной работы: | 25.06.2016 |
|------------------------------------------|------------|

| Дата контроля | Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)                                       | Максимальный балл раздела (модуля) |
|---------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|
| 16.05.2016    | <i>Выдача задания</i>                                                                       |                                    |
| 19.05.2016    | <i>Выбор конструктивной схемы</i>                                                           |                                    |
| 26.05.2016    | <i>Расчет критических параметров проектируемого реактора</i>                                |                                    |
| 02.06.2016    | <i>Расчет характеристик «горячего реактора», многогрупповой нейтронно-физический расчет</i> |                                    |
| 09.06.2016    | <i>Расчет эффектов реактивности</i>                                                         |                                    |
| 20.06.2016    | <i>Сдача работы</i>                                                                         |                                    |

Составил преподаватель:

| Должность                         | ФИО          | Ученая степень, звание | Подпись | Дата       |
|-----------------------------------|--------------|------------------------|---------|------------|
| Старший преподаватель<br>каф. ФЭУ | А.О. Семенов | —                      |         | 16.05.2016 |

**СОГЛАСОВАНО:**

| Зав. кафедрой | ФИО           | Ученая степень, звание | Подпись | Дата       |
|---------------|---------------|------------------------|---------|------------|
| ФЭУ           | О.Ю. Долматов | к.ф.-м.н.,<br>доцент   |         | 16.05.2016 |

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 116 с., 8 рис., 24 табл., 8 источников, 7 прил., 2 чертежа, 1 спецификация.

Ключевые слова: ядерный реактор; нейтронно-физический расчет; многогрупповой расчет; отравление; нуклидный состав;.

Объектом исследования является водо-водяной реактор малой мощности.

Цель работы – выполнение нейтронно-физического расчёта реактора, состоящего в физическом обосновании конструкции и определении совокупности физических параметров, удовлетворяющих поставленным требованиям.

В процессе исследования проводились расчеты нейтронно-физических характеристик реактора, произведен расчет финансовой составляющей работы, описаны факторы, влиявшие на выполнение работы.

В результате исследования были получены нейтронно-физические характеристики реактора заданного материального состава, оценено влияние нуклидного состава на воспроизводящие и размножающие свойства активной зоны реактора, рассчитано отравление реактора, оценена финансовая составляющая работы и описаны внешние факторы, которые влияли на работу.

Основные конструктивные, технологические и технико-эксплуатационные характеристики: ядерный реактор, мощностью 175 МВт, с топливом  $\text{UO}_2$  с обогащением 20 %, использующий в качестве конструкционных материалов хромоникелевый сплав.

Степень внедрения: высокая, проект может использоваться в настоящее время и при продолжении дальнейших исследований.

Область применения: ядерная энергетика.

Экономическая эффективность/значимость работы высокая.

## Перечень определений

**ядерный реактор:** Устройство, предназначенное для организации, управляемой самоподдерживающейся цепной реакции деления, сопровождаемой выделением энергии.

**кампания ядерного реактора:** Время работы реактора с одной и той же загрузкой ядерного топлива.

**кампания ядерного топлива:** Время работы топлива в пересчете на полную мощность реактора; время, в течение которого топливо находится в реакторе.

**выгорание ядерного топлива:** Снижение концентрации любого нуклида в ядерном топливе, вследствие ядерных превращений этого нуклида при работе реактора.

**отравление ядерного реактора:** Процесс накопления в реакторе короткоживущих продуктов деления, участвующих в непроизводительном захвате нейтронов и тем самым снижающих запас реактивности реактора при их образовании.

**шлакование ядерного топлива:** Процесс накопления в работающем реакторе стабильных и долгоживущих продуктов деления, участвующих в непроизводительном захвате нейтронов и тем самым снижающих запас реактивности реактора.

## Обозначения и сокращения

ЯТ – ядерное топливо;

ВВЭР – водо–водяной энергетический реактор;

МэВ – мегаэлектронВольт;

ТКР – температурный коэффициент реактивности;

ТЭР – температурный эффект реактивности;

ТВЭЛ – тепло-выделяющий элемент;

ТВС – тепло-выделяющая сборка;

## Содержание

|                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------|----|
| Введение.....                                                               | 15 |
| 1 Обзор литературы .....                                                    | 16 |
| 1.1 Водо-водяные реакторы .....                                             | 16 |
| 1.2 РИТМ-200 .....                                                          | 17 |
| 1.3 Тепловыделяющие элементы реакторов.....                                 | 18 |
| 1.3.1 Оболочка тепловыделяющих элементов .....                              | 19 |
| 2 Нейтронно-физический расчёт реактора .....                                | 20 |
| 2.1 Предварительный расчет .....                                            | 20 |
| 2.2 Расчет концентраций .....                                               | 24 |
| 2.2.1 Расчет концентрации топлива.....                                      | 24 |
| 2.2.2 Расчет концентрации теплоносителя .....                               | 25 |
| 2.2.3 Расчет концентрации оболочки .....                                    | 25 |
| 2.2.4 Доли материалов в ячейке .....                                        | 26 |
| 2.3 Расчет микросечений и макросечений для «холодного» реактора.....        | 26 |
| 2.3.1 Микросечения и макросечения для $U^{235}$ .....                       | 28 |
| 2.4 Расчет коэффициента размножения «холодного» реактора .....              | 29 |
| 2.4.1 Расчет коэффициента размножения для бесконечной среды .....           | 29 |
| 2.4.1.1 Расчет коэффициента выхода нейтронов на одно поглощение .....       | 29 |
| 2.4.1.2 Расчет коэффициента размножения на быстрых нейтронах .....          | 30 |
| 2.4.1.3 Расчет коэффициента использования тепловых нейтронов .....          | 31 |
| 2.4.1.4 Расчет вероятности избежать резонансного захвата .....              | 34 |
| 2.4.2 Расчет эффективного коэффициента размножения.....                     | 35 |
| 2.5 Оптимизация параметров ячейки .....                                     | 37 |
| 3 Расчет «горячего реактора».....                                           | 39 |
| 3.1 Ядерно-физические характеристики «горячего» реактора.....               | 39 |
| 3.2 Многогрупповой расчет, спектр и ценности нейтронов в активной зоне..... | 45 |
| 3.2.1 Пересчет концентраций .....                                           | 46 |
| 3.2.1 Многогрупповой расчет .....                                           | 47 |

|         |                                                                                                                                           |    |
|---------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.2.3   | Определение параметров двухгруппового расчета .....                                                                                       | 52 |
| 3.3     | Расчёт нуклидного состава.....                                                                                                            | 53 |
| 3.3.1   | Выгорание ядерного топлива.....                                                                                                           | 53 |
| 3.3.2   | Коэффициент воспроизводства .....                                                                                                         | 55 |
| 3.3.3   | Отравление реактора.....                                                                                                                  | 55 |
| 3.3.4   | Определение равновесных ядерных концентраций $Xe$ и $Sm$ .....                                                                            | 55 |
| 3.3.5   | Определение накопления $I$ , $Xe$ , $Pm$ , $Sm$ при работе ядерного реактора на стационарной мощности.....                                | 56 |
| 3.3.6   | Определение потери реактивности при отравлении $Xe$ и $Sm$ в любой момент времени до установления стационарного значения.....             | 57 |
| 3.3.7   | Определение изменения реактивности после остановки реактора.....                                                                          | 58 |
| 3.3.8   | Определение времени достижения полной глубины йодной ямы и прометиевого провала.....                                                      | 58 |
| 3.3.9   | Шлакование реактора .....                                                                                                                 | 58 |
| 3.3.10  | Расчёт реактора в конце кампании .....                                                                                                    | 59 |
| 4       | Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....                                                                      | 62 |
| 4.1     | Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения..... | 62 |
| 4.1.1   | Потенциальные потребители результатов исследования .....                                                                                  | 62 |
| 4.1.2   | Анализ конкурентных технических решений .....                                                                                             | 63 |
| 4.2     | SWOT-анализ.....                                                                                                                          | 65 |
| 4.3     | Планирование научно-исследовательских работ.....                                                                                          | 68 |
| 4.3.1   | Структура работ в рамках научного исследования .....                                                                                      | 68 |
| 4.3.2   | Определение трудоемкости выполнения работ .....                                                                                           | 70 |
| 4.3.3   | Разработка графика проведения научного исследования .....                                                                                 | 71 |
| 4.3.4   | Бюджет научно-технического исследования .....                                                                                             | 75 |
| 4.3.4.1 | Расчет материальных затрат научно-технического исследования .....                                                                         | 75 |
| 4.3.4.2 | Основная заработная плата исполнителей темы .....                                                                                         | 77 |
| 4.3.4.3 | Отчисления во внебюджетные фонды (страхование) .....                                                                                      | 81 |
| 4.3.4.4 | Накладные расходы.....                                                                                                                    | 82 |

|                                                                                                                                          |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.3.4.5 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта ....                                                               | 82  |
| 4.4 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования .....       | 83  |
| 5 Социальная ответственность .....                                                                                                       | 86  |
| 5.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов .....                                                                             | 86  |
| 5.2 Обоснование и разработка мероприятий по снижению уровней опасного и вредного воздействия и устранению их влияния на работающих ..... | 88  |
| 5.2.1 Организационные мероприятия.....                                                                                                   | 88  |
| 5.2.2 Технические мероприятия.....                                                                                                       | 88  |
| 5.3 Условия безопасной работы.....                                                                                                       | 91  |
| 5.4 Электробезопасность .....                                                                                                            | 93  |
| 5.5 Пожарная и взрывная безопасность .....                                                                                               | 94  |
| Заключение .....                                                                                                                         | 97  |
| Список публикаций студента.....                                                                                                          | 98  |
| Список использованных источников .....                                                                                                   | 103 |
| Приложение А .....                                                                                                                       | 104 |
| Приложение Б .....                                                                                                                       | 105 |
| Приложение В.....                                                                                                                        | 106 |
| Приложение Г .....                                                                                                                       | 111 |
| Приложение Д ФЮРА.14.03.02.056 СБ .....                                                                                                  | 113 |
| Приложение Е ФЮРА.14.03.02.056 .....                                                                                                     | 114 |
| Приложение Ж ФЮРА.14.03.02.056 СП.....                                                                                                   | 115 |

## Введение

Начало XX века ознаменовалось несколькими тенденциями, такими как рост промышленного производства и численности населения, что неизменно провоцировало рост энергопотребления.

Рост энергопотребления человечеством приводит к улучшению качества жизни и в свою очередь к росту численности населения. Развитие крупных населённых пунктов послужил толчком к росту централизованного энергоснабжения, по причине экономической рентабельности крупных энергетических центров способных выдавать от 1 Гвт/ч и более, что примерно эквивалентно потреблением энергии городом с населением около 400 тысяч человек.

Основной предпосылкой развития АЭС малой мощности в России, служит её географическое положение, низкая плотность населения, а также отсутствие полноценной инфраструктуры для поддержания устойчивого развития регионов крайнего Севера и Дальнего востока.

Поэтому в работе поставлена цель: выполнить оценочный нейтронно-физический расчет реактора, состоящий в физическом обосновании конструкции и определении совокупности физических параметров, удовлетворяющего поставленным требованиям.

Для достижения поставленной цели, необходимо решить следующие задачи:

- Анализ эксплуатационных параметров и конструктивных особенностей водо-водяных реакторов под давлением
- Проведение предварительного, нейтронно-физического расчета «горячего» и «холодного» реактора, моногруппового расчета реактора для определения спектра плотности потока нейтронов.
- Оценка влияния нуклидного состава топлива на размножающие и воспроизводящие свойства реактора.
- Оценка отравления реактора.

## **1 Обзор литературы**

### **1.1 Водо-водяные реакторы**

Среди огромного многообразия разработанных типов реакторов для АЭС важнейшее место занимают водо-водяные энергетические реакторы. В настоящее время АЭС с реакторами типа ВВЭР во многих районах мира успешно конкурируют с электростанциями, работающими на органическом топливе.

Преимущественное использование водо-водяных реакторов в ядерной энергетике объясняется рядом причин. К ним прежде всего следует отнести то, что вода оказалась наиболее подходящим материалом для ядерных реакторов в качестве замедлителя и теплоносителя. Надо учесть при этом, что она не дефицитна и весьма доступна, издавна используется в различных отраслях техники и поэтому её свойства хорошо изучены. Как замедлитель вода имеет наивысшую замедляющую способность, поэтому водо-водяные реакторы компактны, обладают сравнительно высоким энерговыделением с единицы объема активной зоны. Использование воды одновременно в качестве замедлителя и теплоносителя позволило создать реакторы, сравнительно простые по устройству. Появляется возможность применения одноконтурной схемы с подачей пара теплоносителя в силовую установку.

ВВЭР обладают высокой устойчивостью и саморегулируемостью благодаря отрицательному коэффициенту реактивности. Наведенная активность воды обусловлена короткоживущими нуклидами, что несколько упрощает биологическую защиту и доступ к оборудованию первого контура. Вода как теплоноситель эффективно отводит тепло.

Несмотря на указанные преимущества воды использование её в ядерных реакторах сопряжено и с рядом трудностей. Сравнительно высокое поглощение нейтронов водой отрицательно сказывается на балансе нейтронов в активной зоне и предопределяет применение только обогащенного урана, вследствие чего коэффициент воспроизводства в водо-водяных реакторах сравнительно невысок.

Сильное замедление нейтронов в воде может привести к большим локальным неравномерностям распределения энерговыделения.

Поэтому при конструировании водо-водяных реакторов необходимо предусмотреть равномерное распределение воды в активной зоне. Сравнительно высокая коррозионная активность воды с конструкционными материалами требует специальной и дорогостоящей системы водоподготовки, что заметно складывается на эксплуатационных затратах. Для получения приемлемой температуры необходимо высокое давление. В связи с ограничением температурного уровня для установок с реакторами типа ВВЭР характерен цикл с насыщенным паром. Удельный тепловой поток при использовании водного теплоносителя ограничен критическими тепловыми нагрузками. Все это необходимо учитывать при сооружении водо-водяных реакторов.

## **1.2 РИТМ-200**

На практике принята следующая тактика работы ледоколов: на глубоководных участках проводку караванов осуществляют линейные ледоколы типа «Арктика», на мелководных – ледоколы с ограниченной осадкой типа «Таймыр». При этом необходима передача караванов от линейного ледокола-мелкосидящему и наоборот, что приводит к простоям каравана и ледоколов и негативно отражается на экономической эффективности грузоперевозок. Кроме того, срок эксплуатации практически всех действующих атомных ледоколов с РУ типа ОК-900А подходит к концу. Чтобы обеспечить своевременную полноценную замену выводимых из эксплуатации атомных ледоколов, необходимо форсировать строительство новых судов для обеспечения государственных задач утверждения и защиты геополитических интересов Российской Федерации в Арктике, обеспечения хозяйственной и экономической деятельности и жизни населения в районах Крайнего Севера. Принято решение о необходимости обеспечения двухосадочности нового атомного ледокола. Данное качество делает ледокол универсальным, т.е. способным работать и на

глубоководных, и на мелководных участках, сочетая в себе свойства и линейного, и мелкосидящего ледокола. В настоящее время российские предприятия приступили к созданию универсального атомного ледокола нового поколения, оснащенного РУ РИТМ-200 с интегрированной компоновкой парогенерирующего блока (ПГБ).

При проектировании реакторной установки для нового атомного ледокола реализован комплексный подход для определения основных параметров первого контура, выбора оборудования и его компоновки, принятия оптимального состава параметров систем безопасности.

В проекте использована активная зона кассетного типа с металлокерамическим топливом повышенной ураноемкости, по сравнению с интерметаллидным топливом, удовлетворяющая требованиям нераспространения ядерного оружия.

### **1.3 Тепловыделяющие элементы реакторов**

ТВЭЛ состоит из топливного сердечника, оболочки, отделяющей сердечник от теплоносителя и замедлителя, и концевых деталей, герметизирующих полость сердечника.

В качестве топлива используется диоксид урана, обладающий высокой температурной стойкостью ( $T_{пл} = 2800\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) и что особенно важно, высокой радиационной стойкостью.

Недостатком двуокиси урана является меньшая по сравнению с металлическим топливом плотность и процентное содержание урана, чрезвычайно низкая теплопроводность.

### **1.3.1 Оболочка тепловыделяющих элементов**

Оболочки твэлов работают в трудных условиях при одновременном длительном воздействии высоких температур и полей облучения, тепловых потоков, давления, коррозионного действия теплоносителя, топлива и продуктов деления, в связи с этим к ним предъявляют жесткие требования:

- малое сечение поглощения нейтронов;
- механическая прочность и неизменность формы под действием температурного и радиационного воздействия;
- высокая теплопроводность;
- коррозионная и эрозионная стойкость в теплоносителе и совместимость с ядерным топливом.

Оболочка твэла представляет собой трубу, изготовленную из хромоникелевого сплава. Толщину оболочки выбирают, исходя из условий обеспечения достаточной прочности.

## 2 Нейтронно-физический расчёт реактора

### 2.1 Предварительный расчет

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

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:

$$V_{a.z.} = \frac{N}{N_0} \cdot \eta, \text{ см}^3; \quad (2.1)$$

$$D_{a.z.} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot V_{a.z.}}{\pi \cdot m}}, \text{ см}; \quad (2.2)$$

$$H_{a.z.} = m \cdot D_{a.z.}, \text{ см}, \quad (2.3)$$

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

$m$  – отношение высоты к диаметру;

$N$  – заданная мощность реактора;

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

Максимальная удельная объемная нагрузка активной зоны:

$$N_{0_{\max}} = \overline{N_0} \cdot K_V, \text{ кВт/л}, \quad (2.4)$$

где  $K_V$  – объемный коэффициент неравномерности тепловыделения.

Максимально допустимая тепловая нагрузка:

$$q_{\max} = \frac{N_{0\max} \cdot S_{\text{яч}}}{0,116 \cdot \Pi_0 \cdot n}, \text{ Гкал/м}^2 \cdot \text{ч}, \quad (2.5)$$

где  $\Pi_0$  – периметр тепловыделяющей поверхности одного ТВЭЛА;

$n$  – число ТВЭЛОВ в кассете;

$S_{\text{яч}}$  – площадь сечения ячейки.

Необходимая для отвода тепла скорость определяется в максимально напряженно тепловыделяющем элементе из уравнения баланса тепла:

$$v = \frac{q_{\max} \cdot \Pi_0 \cdot H}{3,6 \cdot K_z \cdot \rho \cdot \Delta i \cdot S_{\text{мн1}}}, \text{ м/с}, \quad (2.6)$$

где  $v$  – скорость теплоносителя на входе;

$K_z$  – осевой коэффициент неравномерности;

$S_{\text{мн1}}$  – площадь сечения прохода теплоносителя, приходящаяся на один элемент, см<sup>2</sup>;

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

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

Если теплоемкость  $C_p$  (ккал/кг·град) не зависит от температуры, то:

$$\Delta i = C_p (t_{\text{вых}} - t_{\text{вх}}), \text{ ккал/кг}. \quad (2.7)$$

В противном случае величину теплосодержания как функцию параметров теплоносителя следует определять по специальным таблицам или графикам.

Для проведения расчета были приняты следующие величины:

|                                                    |                                |
|----------------------------------------------------|--------------------------------|
| Тепловая мощность                                  | $N = 175 \text{ МВт}$          |
| Средняя удельная объемная нагрузка                 | $\bar{N}_0 = 85 \text{ кВт/л}$ |
| Коэффициент увеличения объёма реактора за счёт СУЗ | $\eta = 1,2$                   |
| Отношение высоты к диаметру                        | $m = 0,75$                     |
| Объемный коэффициент неравномерности               | $K_V = 3$                      |
| Осевой коэффициент неравномерности                 | $K_z = 1,2$                    |
| Размер ячейки под ключ                             | 12,8 см                        |
| Число ТВЭЛОВ в кассете                             | 102                            |
| Диаметр топливной таблетки                         | 0,87 см                        |
| Внешний диаметр ТВЭЛА                              | 0,91 см                        |
| Внутренний диаметр ТВЭЛА                           | 0,87 см                        |

Значения исходных параметров  $\bar{N}_0$  и  $m$  были выбраны для обеспечения соответствия между рассчитываемым реактором и его реальным аналогом – реактором РИТМ-200, линейные размеры которого равны:

|                       |        |
|-----------------------|--------|
| Высота активной зоны  | 120 см |
| Диаметр активной зоны | 160 см |

Объем активной зоны:

$$V_{a.z.} = \frac{N}{\bar{N}_0} \cdot \eta = \frac{175 \cdot 10^3 \cdot 1,2}{85 \cdot 10^{-3}} = 2,471 \cdot 10^6 \text{ см}^3.$$

Диаметр активной зоны:

$$D_{a.z.} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot V_{a.z.}}{\pi \cdot m}} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 2,47 \cdot 10^6}{3,14 \cdot 0,975}} = 161,269 \text{ см.}$$

Высота активной зоны:

$$H_{a.z.} = m \cdot D_{a.z.} = 0,75 \cdot 161,269 = 120,951 \text{ см.}$$

Максимальная удельная объемная нагрузка активной зоны:

$$N_{0_{\max}} = \bar{N}_0 \cdot K_V = 85 \cdot 10^{-3} \cdot 3 = 255 \cdot 10^{-3} \text{ кВт/см}^3.$$

Площадь сечения ячейки:

$$S_{яч} = 2 \cdot \sqrt{3} \cdot \left(\frac{a_{яч}}{2}\right)^2 = 2 \cdot \sqrt{3} \cdot \left(\frac{12,8}{2}\right)^2 = 141,89 \text{ см}^2,$$

где  $a_{яч}$  – размер кассеты «под ключ», см.

Периметр тепловыделяющей поверхности твэла:

$$P_0 = \pi \cdot d = 3,14 \cdot 0,91 = 2,859 \text{ см.}$$

Максимально допустимая тепловая нагрузка:

$$q_{\max} = \frac{N_{0\max} \cdot S_{яч}}{0,116 \cdot P_0 \cdot n} = \frac{255 \cdot 10^{-3} \cdot 141,890}{0,116 \cdot 2,859 \cdot 102} = 1,070 \text{ Гкал/м}^2 \cdot \text{ч.}$$

Площадь сечения твэлов в кассете:

$$S_{твэл} = \pi \cdot \frac{D_{твэл\text{внеш.}}^2 \cdot n}{4} = 3,14 \cdot \frac{0,91^2 \cdot 102}{4} = 66,340 \text{ см}^2.$$

При параметрах теплоносителя  $\bar{t} = 295 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $P = 15,7 \text{ МПа}$ ,  $\rho = 0,737 \text{ г/см}^3$  и  $C_p = 1,275 \text{ ккал/кг} \cdot \text{град}$ :

$$\Delta i = C_p \cdot (t_{\text{вых}} - t_{\text{вх}}) = 1,275 \cdot (313 - 277) = 45,9 \text{ ккал/кг.}$$

Площадь сечения прохода теплоносителя, приходящаяся на 1 элемент:

$$S_{m_1} = \frac{S_{яч.} - S_{твэл}}{n} = \frac{141,890 - 66,340}{102} = 0,741 \text{ см}^2;$$

$$v = \frac{1,070 \cdot 2,859 \cdot 120,951}{3,6 \cdot 1,2 \cdot 0,737 \cdot 45,9 \cdot 0,741} = 3,417 \text{ м/с.}$$

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

Принятые в предварительном тепловом расчёте, шаг решетки, размеры твэла, скорость, проходное сечение для теплоносителя, размеры реактора уточняются в результате последующего физического расчёта.

## 2.2 Расчет концентраций

Поскольку ячейка реактора состоит из нескольких зон с различными ядерными свойствами, необходимо рассчитать нейтронно-физические характеристики (сечения взаимодействия, коэффициенты диффузии, замедляющие свойства) для каждой зоны (топливо – диоксид урана (20 % обогащения по  $U^{235}$ ), оболочка – хромоникелевый сплав, теплоноситель и замедлитель – легкая вода  $H_2O$ ).

Вычисление ядерных концентраций производят для каждого элемента активной зоны и отражателя. Ядерная концентрация находится по формуле:

$$N = \frac{N_a \cdot \rho}{A}, \text{ ядер/см}^3, \quad (2.8)$$

где  $\rho$  – плотность вещества, г/см<sup>3</sup>;

$A$  – атомный вес элемента.

### 2.2.1 Расчет концентрации топлива

Топливом является двуокись урана ( $UO_2$ ), обогащенная по  $U^{235}$  на 20 %, поэтому ядерная концентрация топлива рассчитывается следующим образом:

$$N_{UO_2} = \frac{N_a \cdot \rho_{UO_2}}{A_{UO_2}} = \frac{6,023 \cdot 10^{23} \cdot 10,2}{269,4} = 2,28 \cdot 10^{22} \text{ молекул/см}^3.$$

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

$$N_{U^{235}} = C_{U^{235}} \cdot N_{UO_2} = 0,2 \cdot 2,28 \cdot 10^{22} = 4,56 \cdot 10^{21} \text{ ядер/см}^3;$$

$$N_{U^{238}} = (1 - C_{U^{235}}) \cdot N_{UO_2} = (1 - 0,2) \cdot 2,28 \cdot 10^{22} = 1,824 \cdot 10^{22} \text{ ядер/см}^3;$$

$$N_O = 2 \cdot N_{UO_2} = 2 \cdot 2,28 \cdot 10^{22} = 4,56 \cdot 10^{22} \text{ ядер/см}^3.$$

### 2.2.2 Расчет концентрации теплоносителя

Теплоносителем в данном ядерном реакторе служит вода.

$$N_{H_2O} = \frac{N_a \cdot \rho_{H_2O}}{A_{H_2O}} = \frac{6,023 \cdot 10^{23} \cdot 0,737}{18} = 2,465 \cdot 10^{22} \text{ молекул/см}^3;$$

$$N_O = N_{H_2O} = 2,465 \cdot 10^{22} \text{ ядер/см}^3;$$

$$N_H = 2 \cdot N_{H_2O} = 2 \cdot 2,465 \cdot 10^{22} = 4,931 \cdot 10^{22} \text{ ядер/см}^3.$$

### 2.2.3 Расчет концентрации оболочки

Оболочка твэлов и кассет – хромоникелевый сплав (20,5 % Cr; 0,8 % Al; 2,6% Ti; 73,5 % Ni; 2,6 % Fe). Вычисление концентраций производится следующим образом:

$$N_{Cr} = C_{Cr} \cdot \frac{N_a \cdot \rho_{сплава}}{A_{сплава}} = 0,205 \cdot \frac{6,023 \cdot 10^{23} \cdot 8,2}{56,945} = 1,778 \cdot 10^{22} \text{ ядер/см}^3;$$

$$N_{Al} = C_{Al} \cdot \frac{N_a \cdot \rho_{сплава}}{A_{сплава}} = 0,008 \cdot \frac{6,023 \cdot 10^{23} \cdot 8,2}{56,945} = 6,937 \cdot 10^{20} \text{ ядер/см}^3;$$

$$N_{Ti} = C_{Ti} \cdot \frac{N_a \cdot \rho_{сплава}}{A_{сплава}} = 0,026 \cdot \frac{6,023 \cdot 10^{23} \cdot 8,2}{56,945} = 2,255 \cdot 10^{21} \text{ ядер/см}^3;$$

$$N_{Ni} = C_{Ni} \cdot \frac{N_a \cdot \rho_{сплава}}{A_{сплава}} = 0,735 \cdot \frac{6,023 \cdot 10^{23} \cdot 8,2}{56,945} = 6,374 \cdot 10^{22} \text{ ядер/см}^3;$$

$$N_{Fe} = C_{Fe} \cdot \frac{N_a \cdot \rho_{сплава}}{A_{сплава}} = 0,026 \cdot \frac{6,023 \cdot 10^{23} \cdot 8,2}{56,945} = 2,255 \cdot 10^{21} \text{ ядер/см}^3.$$

## 2.2.4 Доли материалов в ячейке

Площадь сечения топлива определяется по формуле:

$$S_{\text{топ}} = n \cdot S_{\text{топ.таб.}} = n \cdot \pi \cdot \frac{D_{\text{серд}}^2}{4} = 102 \cdot 3,14 \cdot \frac{0,87^2}{4} = 60,636 \text{ см}^2.$$

Площадь сечения прохода теплоносителя – замедлителя:

$$S_{\text{тн}} = n \cdot S_{\text{тн}_1} = 102 \cdot 0,741 = 75,55 \text{ см}^2.$$

Доля топлива:

$$\beta_{\text{топ}} = \frac{S_{\text{топ}}}{S_{\text{яч}}} = \frac{60,636}{141,890} = 0,427.$$

Доля теплоносителя – замедлителя:

$$\beta_{\text{тн}} = \frac{S_{\text{тн}}}{S_{\text{яч}}} = \frac{75,55}{141,89} = 0,532.$$

Доля конструкционных материалов:

$$\beta_{\text{к.м.}} = 1 - \beta_{\text{топ}} - \beta_{\text{тн}} = 1 - 0,427 - 0,532 = 0,040.$$

## 2.3 Расчет микросечений и макросечений для «холодного» реактора

Необходимость обработки сечений связана с тем, что их значения, приведенные в справочниках, относятся к энергии нейтронов  $E = 0,025 \text{ эВ}$  соответствующей при распределении нейтронов по спектру Максвелла наиболее вероятной скорости  $v = 2200 \text{ м/с}$ .

При физико-нейтронных расчетах все поперечные сечения должны быть отнесены к средней скорости нейтронов. Следует отметить, что Максвелловский спектр тепловых нейтронов постепенно переходит в спектр замедляющихся нейтронов при температуре 293 К при энергии примерно равной  $E = 0,2 \text{ эВ}$ , которая называется «энергией сшивки».

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

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

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

$$\sigma_a = \sigma_{a_0} \cdot 0,884 \cdot f_a \cdot \sqrt{\frac{293}{T_{н.г.}}}; \quad (2.9)$$

$$\sigma_f = \sigma_{f_0} \cdot 0,884 \cdot f_f \cdot \sqrt{\frac{293}{T_{н.г.}}}, \quad (2.10)$$

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

$f_a, f_f$  – поправочный коэффициент  $f$ , учитывающий отклонение сечения поглощения и деления от закона  $\frac{1}{v^2}$ .

В тепловых реакторах температура нейтронного газа превышает температуру среды на 50 – 100 градусов.

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

$$\Sigma_i = \sigma_i \cdot N_i. \quad (2.11)$$

Замедляющую способность вещества можно оценить по соотношению:

$$\xi \Sigma_{s_i} = \sum_{i=1}^m \xi_i \cdot \Sigma_{s_i}, \quad (2.12)$$

где  $\xi_i$  – логарифмический декремент,  $\xi_i = \frac{2}{A_i + \frac{2}{3}}$ .

### 2.3.1 Микросечения и макросечения для $U^{235}$

Произведем расчет сечений для температуры нейтронного газа равной 400 К.

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

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

$\sigma_{a_0} = 683$  барн – табличное значение сечения поглощения  $U^{235}$ .

$\sigma_{f_0} = 582$  барн – табличное значение сечения деления  $U^{235}$ .

Тогда, с учетом поправок, сечения для  $U^{235}$  пересчитываются по формулам (2.9) и (2.10):

$$\sigma_a^{U^{235}} = 683 \cdot 0,884 \cdot 0,96 \cdot \sqrt{\frac{293}{400}} = 496,076 \text{ барн};$$

$$\sigma_f^{U^{235}} = 582 \cdot 0,884 \cdot 0,96 \cdot \sqrt{\frac{293}{400}} = 422,718 \text{ барн};$$

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

$$\mu_s^{U^{235}} = 0; \sigma_{tr}^{U^{235}} = 496,076 + 15 \cdot (1 - 0) = 511,076 \text{ барн};$$

$$\Sigma_a^{U^{235}} = 496,076 \cdot 10^{-24} \cdot 4,56 \cdot 10^{21} = 2,262 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_f^{U^{235}} = 422,718 \cdot 10^{-24} \cdot 4,56 \cdot 10^{21} = 1,928 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_s^{U^{235}} = 15 \cdot 10^{-24} \cdot 4,56 \cdot 10^{21} = 0,068 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_{tr}^{U^{235}} = 511,076 \cdot 10^{-24} \cdot 4,56 \cdot 10^{21} = 2,331 \text{ см}^{-1};$$

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

$$\xi \Sigma_s^{U^{235}} = 8,49 \cdot 10^{-3} \cdot 0,068 = 5,8 \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-1}.$$

Все рассчитанные значения микросечений и макросечений приведены в таблице А.1. приложения А.

## 2.4 Расчет коэффициента размножения «холодного» реактора

### 2.4.1 Расчет коэффициента размножения для бесконечной среды

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

Коэффициент размножения для бесконечной среды определяется как произведение четырёх сомножителей:

$$k_{\infty} = \varepsilon \cdot \varphi \cdot \theta \cdot \eta, \quad (2.13)$$

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

$\varphi$  – вероятность избежать резонансного захвата;

$\theta$  – коэффициент использования тепловых нейтронов;

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

#### 2.4.1.1 Расчет коэффициента выхода нейтронов на одно поглощение

Согласно определению  $\eta$  – коэффициент, характеризующий количество вторичных нейтронов деления, приходящихся на один поглощенный топливом первичный тепловой нейтрон. Выражение для  $\eta$ , когда топливо применяется в виде сплава или химического соединения, имеет вид:

$$\eta = \nu_f \cdot \frac{\Sigma_f^{mon}}{\Sigma_a^{mon}}, \quad (2.14)$$

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

$$\eta = 2,42 \cdot \frac{1,928}{2,300} = 2,029.$$

### 2.4.1.2 Расчет коэффициента размножения на быстрых нейтронах

Коэффициент размножения на быстрых нейтронах  $\varepsilon$  – величина, которая характеризует увеличение числа нейтронов за счет деления быстрыми нейтронами.

В реакторах на тепловых нейтронах основное значение имеет деление под действием тепловых нейтронов. Вклад в деление на быстрых нейтронах имеет вспомогательное значение. Этот вклад был впервые оценен при создании гетерогенных реакторов на природном уране.

Коэффициент размножения в них незначительно превышал единицу, поэтому увеличение  $\varepsilon$  на несколько процентов за счет деления быстрыми нейтронами имеет существенное значение. Необходимо отметить, что в реакторах типа ВВЭР коэффициент размножения на быстрых нейтронах превышает этот же коэффициент в других реакторах на тепловых нейтронах. Это обусловлено тем, что в ВВЭР тесная решетка, а в тесной решетке длина рассеяния быстрых нейтронов сравнима с расстоянием между блоками, поэтому в тесных решетках имеет место быть перекрестный эффект, который увеличивает коэффициент  $\varepsilon$ . Суть этого эффекта заключается в том, что быстрый нейтрон вылетевший из топливного блока имеет некую вероятность провзаимодействовать в другом топливном блоке будучи еще быстрым, так как шаг в тесной решетке (расстояние между блоками) сравним с длиной рассеяния быстрых нейтронов. Для расчета  $\varepsilon$  в тесных решетках можно пользоваться эмпирической формулой Батя-Цыганкова:

$$\varepsilon = \varepsilon_{\text{ол}} + \frac{\varepsilon_{\infty} - \varepsilon_{\text{ол}}}{1 + 2,3 \frac{N_H}{N_8}}, \quad (2.15)$$

где  $\varepsilon_{\infty} = 1,19$ ;

$\frac{N_H}{N_8}$  – отношение числа атомов водорода к числу атомов урана в активной

зоне;

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

Уран-водное отношение  $N_H/N_8$  найдем следующим образом:

$$\frac{N_H}{N_8} = 2 \cdot \frac{S_{H_2O} \cdot H_{a.3} \cdot \rho_{H_2O} \cdot 238}{S_{U_2O} \cdot H_{a.3} \cdot \rho_{U_2O} \cdot 18} = 2 \cdot \frac{0,741 \cdot 238 \cdot 0,737}{0,594 \cdot 10,2 \cdot 18} = 2,38; \quad (2.16)$$

$$\varepsilon_{\text{бл}} = 1 + \frac{0,092 \cdot P}{1 - 0,52 \cdot P} \cdot \varepsilon_1; \quad (2.17)$$

$$\varepsilon_1 = \frac{N^{U^{238}}}{N^{U^{238}_{\text{природ}}}}, \quad (2.18)$$

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

$\varepsilon_1$  – пористость блока по  $U^{238}$ ;

$N^{U^{238}_{\text{природ}}}$  – число ядер  $U^{238}$  в 1 см<sup>3</sup> естественного урана;

$N^{U^{238}}$  – число ядер  $U^{238}$  в 1 см<sup>3</sup> блока.

$$\varepsilon_1 = \frac{1,824 \cdot 10^{22}}{\frac{6,023 \cdot 10^{23} \cdot 18,7 \cdot 0,9927}{238}} = 0,388.$$

Для  $R_{\text{серед}} = 0,435$  см и  $R_{\text{твэла}_{\text{внеш}}} = 0,455$  см,  $P = 0,06$ :

$$\varepsilon_{\text{бл}} = 1 + \frac{0,092 \cdot 0,06}{1 - 0,52 \cdot 0,06} \cdot 0,388 = 1,002;$$

$$\varepsilon = 1,002 + \frac{1,19 - 1,002}{1 + 2,3 \cdot 2,38} = 1,031.$$

### 2.4.1.3 Расчет коэффициента использования тепловых нейтронов

Коэффициент использования тепловых нейтронов  $\theta$  – это вероятность для теплового нейтрона поглотиться в топливе, т.к. все рабочие каналы содержат сборки твэл, то можно использовать способ гомогенизации, при котором все

материалы рабочего канала считают равномерно перемешанными.

Реальная ячейка заменяется эквивалентной ячейкой с одним фиктивным цилиндрическим блоком. Фиктивный блок образуется путем гомогенизации ядерного горючего, конструкционных материалов.

Расчёт  $\theta$  в этом случае ведут в два этапа. Сначала определяют величину  $\theta'_{\text{ф.б.}}$ , представляющую отношение числа тепловых нейтронов, поглощенных в фиктивном блоке, к общему числу поглощенных тепловых нейтронов:

$$\frac{1}{\theta'_{\text{ф.б.}}} = 1 + F \cdot \frac{S_{\text{зам}} \cdot \Sigma_{\text{зам}}}{S_{\text{ф.б.}} \cdot \Sigma_{\text{ф.б.}}} + (E - 1). \quad (2.19)$$

Для цилиндрического уранового стержня коэффициент экранирования:

$$F = \frac{\overline{\Phi}_{\text{зам}}}{\overline{\Phi}_{\text{ф.б.}}} = \frac{1}{2} \frac{R_{\text{ф.б.}}}{L_{\text{ф.б.}}} \frac{I_0\left(\frac{R_{\text{ф.б.}}}{L_{\text{ф.б.}}}\right)}{I_1\left(\frac{R_{\text{ф.б.}}}{L_{\text{ф.б.}}}\right)}. \quad (2.20)$$

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

$$(E - 1) = 0,5 \cdot \left(\frac{R_{\text{зам}}}{L_{\text{зам}}}\right)^2 \cdot \left(\ln\left(\frac{R_{\text{зам}}}{R_{\text{ф.б.}}}\right) - 0,75\right). \quad (2.21)$$

Затем рассчитывают коэффициент использования тепловых нейтронов по формуле:

$$\theta = \theta'_{\text{ф.б.}} \cdot \theta_0, \quad (2.22)$$

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

$$\theta_0 = \frac{S_{\text{мон}} \cdot \Sigma_{\text{мон}}}{S_{\text{ф.б.}} \cdot \Sigma_{\text{ф.б.}}}. \quad (2.23)$$

Параметры необходимые для расчёта:

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

$$S_{\text{ф.б.}} = \pi \cdot R_{\text{твэл}}^2 = 3,14 \cdot 0,455^2 = 0,65 \text{ см}^2;$$

$$S_{зам} = 0,741 \text{ см}^2;$$

$$S_{км} = S_{\phi} - S_{табл.} = 0,65 - 0,594 = 0,056 \text{ см}^2;$$

$$R_{зам} = \sqrt{\frac{S_{зам} + S_{\phi.б.}}{\pi}} = \sqrt{\frac{0,741 + 0,650}{3,14}} = 0,974 \text{ см.}$$

Сечения, усредненные по фиктивному блоку:

$$\Sigma_{a_{\phi.б.}} = \frac{1}{S_{\phi.б.}} \cdot \sum_{i=1}^m \Sigma_{a_{\phi.б.}} \cdot S_i = \frac{\Sigma_{a_{мон}} \cdot S_{мон} + \Sigma_{a_{к.м.}} \cdot S_{к.м.}}{S_{\phi.б.}};$$

$$\Sigma_{a_{\phi.б.}} = \frac{2,3 \cdot 0,594 + 0,278 \cdot 0,056}{0,65} = 2,126 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_{tr_{\phi.б.}} = \frac{1}{S_{\phi.б.}} \cdot \sum_{i=1}^m \Sigma_{tr_{\phi.б.}} \cdot S_i = \frac{\Sigma_{tr_{мон}} \cdot S_{мон} + \Sigma_{tr_{к.м.}} \cdot S_{к.м.}}{S_{\phi.б.}};$$

$$\Sigma_{tr_{\phi.б.}} = \frac{2,696 \cdot 0,594 + 1,460 \cdot 0,205}{0,65} = 2,590 \text{ см}^{-1}.$$

С помощью усреднённых сечений по фиктивному блоку длину диффузии определяется:

$$L_{\phi.б.} = \sqrt{\frac{1}{3 \cdot \Sigma_{a_{\phi.б.}} \cdot \Sigma_{tr_{\phi.б.}}}} = \sqrt{\frac{1}{3 \cdot 2,126 \cdot 2,59}} = 0,246 \text{ см};$$

$$L_{зам} = \sqrt{\frac{1}{3 \cdot \Sigma_{a_{зам}} \cdot \Sigma_{tr_{зам}}}} = \sqrt{\frac{1}{3 \cdot 0,0221 \cdot 2,31}} = 2,555 \text{ см};$$

$$(E - 1) = 0,5 \cdot \left( \frac{0,486}{2,555} \right)^2 \cdot \left( \ln \left( \frac{0,486}{0,455} \right) - 0,75 \right) = 0,001;$$

$$F = \frac{1}{2} \cdot \frac{0,455}{0,246} \cdot \frac{I_0 \left( \frac{0,455}{0,246} \right)}{I_1 \left( \frac{0,455}{0,246} \right)} = 1,377;$$

$$\frac{1}{\theta'_{\phi.б.}} = 1 + 1,377 \cdot \frac{0,741 \cdot 0,022}{0,65 \cdot 2,126} + 0,001 = 1,017, \text{ тогда } \theta'_{\phi.б.} = 0,983;$$

$$\theta_0 = \frac{0,594 \cdot 2,3}{0,65 \cdot 2,126} = 0,989.$$

Подставив  $\theta'_{\phi.\bar{\phi}}$  и  $\theta_0$  в формулу (2.22) коэффициент использования тепловых нейтронов равен:

$$\theta = 0,983 \cdot 0,989 = 0,972.$$

#### 2.4.1.4 Расчет вероятности избежать резонансного захвата

Вероятность избежать резонансного захвата – это доля нейтронов, не поглотившихся при замедлении. В энергетических ядерных реакторах, как правило, применяются сборки твэлов, которые состоят из нескольких блоков ядерного горючего. Для ячейки со стрежневыми блоками коэффициент  $\varphi$  рассчитывается по формуле:

$$\varphi = \exp \left( - \frac{k_T \cdot R_U \cdot \sqrt{R \cdot n \cdot \varepsilon_1} + 0,73 \cdot n \cdot R_U^2 \cdot \varepsilon_1}{\xi \Sigma_{s_{зам}} \cdot S_{зам} + \xi \Sigma_{s_{\phi.\bar{\phi}}} \cdot S_{\phi.\bar{\phi}}} \right), \quad (2.24)$$

где  $k_T$  – температурный коэффициент;

$\varepsilon_1$  – пористость блока по  $U^{238}$ ;

$R_U$  – радиус уранового блока, см;

$R$  – радиус пучка твэлов, см;

$n$  – число твэлов;

$\xi \Sigma_{s_{зам}}$  и  $\xi \Sigma_{s_{\phi.\bar{\phi}}}$  – замедляющая способность замедлителя и фиктивного блока соответственно.

Коэффициент  $k_T$  вычисляется по формуле:

$$k_T = 0,775 \cdot (1 + 17,5 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{T_{мон}}). \quad (2.25)$$

При температуре  $T = 400$  К температурный коэффициент равен:

$$k_T = 0,775 \cdot (1 + 17,5 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{400}) = 1,046;$$

$$R = \frac{d_{яч}}{2} = \frac{12,8}{2} = 6,4 \text{ см},$$

$$\xi \Sigma_{s_{ф.б.}} = \frac{S_{топл.} \cdot \xi \Sigma_{топл.} + S_{зам.} \cdot \xi \Sigma_{зам.} + S_{об.} \cdot \xi \Sigma_{об.}}{S_{ф.б.}};$$

$$\xi \Sigma_{s_{ф.б.}} = \frac{0,594 \cdot 0,022 + 0,056 \cdot 0,041}{0,65} = 0,024 \text{ см}^{-1};$$

$$\varphi = \exp \left( - \frac{1,046 \cdot 0,435 \cdot \sqrt{102 \cdot 6,4 \cdot 0,388} + 0,73 \cdot 102 \cdot 0,435^2 \cdot 0,388}{1,35 \cdot 75,55 + 0,024 \cdot 0,65} \right) = 0,883.$$

Подставив найденные значения коэффициентов  $\mu$ ,  $\varphi$ ,  $\theta$ ,  $\eta$  в формулу (2.13) найдём коэффициент размножения для бесконечной среды:

$$k_{\infty} = 1,031 \cdot 0,883 \cdot 0,972 \cdot 2,029 = 1,795.$$

## 2.4.2 Расчет эффективного коэффициента размножения

Эффективный коэффициент размножения вычисляется:

$$k_{эф} = \frac{k_{\infty} \cdot \exp(-B^2 \cdot \tau_p)}{1 + B^2 \cdot L_p^2}, \quad (2.26)$$

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

$\tau_p$  – возраст нейтронов в решётке;

$B^2$  – геометрический параметр.

Квадрат длины диффузии в решетке рассчитывается по формуле:

$$L_p^2 = L_{зам}^2 \cdot (1 - \theta) + L_{ф.б.}^2 \cdot \theta; \quad (2.27)$$

$$L_p^2 = 2,55^2 \cdot (1 - 0,972) + 0,246^2 \cdot 0,972 = 0,241 \text{ см}^2.$$

Так как объем ядерного горючего, теплоносителя и конструкционных материалов составляет заметную долю в объеме активной зоны, то возраст нейтронов оценивается по приближенной формуле:

$$\tau_p = \tau_{зам} \left( \frac{S_{яч}}{S_{зам}} \right)^{0,5} \text{ см}^2, \quad (2.28)$$

где  $\tau_{зам} = 27,3 \text{ см}^2$  – возраст нейтронов в замедлителе.

$$\tau_p = 27,3 \cdot \left( \frac{141,89}{75,55} \right)^{0,5} = 37,413 \text{ см}^2.$$

Для реактора с отражателем в случае применения формулы (2.29) необходимо учитывать эффективные добавки за счет отражателя ( $\delta$ ). Так, для цилиндрического реактора:

$$B^2 = \left( \frac{\pi}{H_9} \right)^2 + \left( \frac{2,405}{R_9} \right)^2, \quad (2.29)$$

где  $H_9, R_9$  – эквивалентные размеры реактора, см;

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

Экстраполированные размеры реактора рассчитываются по формулам:

$$H_9 = H_{a.з.} + 2\delta \text{ см}; \quad (2.30)$$

$$R_9 = R_{a.з.} + \delta \text{ см}. \quad (2.31)$$

Для водо-водяных реакторов с водным отражателем:

$$\delta = 7,2 + 0,1 \cdot (M^2 - 40) \text{ см}, \quad (2.32)$$

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

Подставив численные величины в формулы (2.29), (2.30), (2.31), (2.32), значения искомых параметров равны:

$$M_{\text{отр}}^2 = \tau_{H_2O} + L_{H_2O}^2 = 27,3 + 6,529 = 33,829 \text{ см}^2;$$

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

$$H_9 = 120,951 + 2 \cdot 6,583 = 134,117 \text{ см};$$

$$R_9 = \frac{161,269}{2} + 6,583 = 87,217 \text{ см};$$

$$B^2 = \left( \frac{\pi}{134,117} \right)^2 + \left( \frac{2,405}{87,217} \right)^2 = 1,31 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-2}.$$

Подставив полученные значения в формулу (2.26) определим эффективный коэффициент размножения:

$$k_{\text{эф}} = \frac{1,795 \cdot \exp(-1,31 \cdot 10^{-3} \cdot 37,413)}{1 + 1,31 \cdot 10^{-3} \cdot 0,241} = 1,709.$$

## 2.5 Оптимизация параметров ячейки

Оптимизация параметров ячейки производится для нахождения наибольшего эффективного коэффициента размножения, производится в 2 этапа. На первом этапе изменяется шаг решётки от которого зависит размер ячейки под ключ при постоянном диаметре твэла. Полученные данные в ходе 1-го шага оптимизации приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Изменение размера под ключ

| Параметр                   | Значение |        |        |        |        |        |        |        |
|----------------------------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Размер ячейки под ключ, см | 12       | 12,5   | 12,8   | 13     | 13,5   | 14     | 14,5   | 15     |
| Внешний диаметр твэла, см  | 0,91     | 0,91   | 0,91   | 0,91   | 0,91   | 0,91   | 0,91   | 0,91   |
| Диаметр топливной табл, см | 0,87     | 0,87   | 0,87   | 0,87   | 0,87   | 0,87   | 0,87   | 0,87   |
| $V$ , м/с                  | 3,8878   | 3,5697 | 3,4175 | 3,1390 | 2,6714 | 2,5966 | 2,5321 | 2,4759 |
| $k_{\infty}$               | 1,7641   | 1,7865 | 1,7953 | 1,7997 | 1,8063 | 1,8077 | 1,8052 | 1,7994 |
| $k_{эф}$                   | 1,6736   | 1,6984 | 1,7086 | 1,7138 | 1,7223 | 1,7260 | 1,7248 | 1,7205 |

На втором этапе оптимизации при оптимальном значении размера ячейки под ключ изменяется внешний диаметр твэла, изменяя тем самым и диаметр топливной таблетки. Данные полученные в этом шаге оптимизации приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Изменение внешнего диаметра твэла

| Параметр                   | Значение |        |        |        |        |        |        |        |
|----------------------------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Размер ячейки под ключ, см | 14       | 14     | 14     | 14     | 14     | 14     | 14     | 14     |
| Внешний диаметр твэла, см  | 0,75     | 0,8    | 0,85   | 0,91   | 0,95   | 1      | 1,05   | 1,1    |
| Диаметр топливной табл, см | 0,71     | 0,76   | 0,81   | 0,87   | 0,91   | 0,96   | 1,01   | 1,06   |
| $V$ , м/с                  | 2,4773   | 2,6071 | 2,7612 | 2,9871 | 3,1698 | 3,4460 | 3,7936 | 4,2423 |
| $k_{\infty}$               | 1,7785   | 1,7928 | 1,8025 | 1,8077 | 1,8067 | 1,7994 | 1,7836 | 1,7568 |
| $k_{эф}$                   | 1,7041   | 1,7162 | 1,7235 | 1,7260 | 1,7224 | 1,7121 | 1,6931 | 1,6629 |

Оптимальными параметрами принимаются параметры при которых эффективный коэффициент размножения будет максимальным и приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Оптимальные параметры ячейки

|                            |        |
|----------------------------|--------|
| Размер ячейки под ключ, см | 14     |
| Внешний диаметр твэла, см  | 0,91   |
| Диаметр топливной табл, см | 0,87   |
| $\nu$ , м/с                | 2,9871 |
| $k_{\infty}$               | 1,8077 |
| $k_{эф}$                   | 1,7260 |

### 3 Расчет «горячего реактора»

#### 3.1 Ядерно-физические характеристики «горячего» реактора

Эффективная температура нейтронного газа определяется по формуле:

$$T_{н.г.}^{эфф} = T_{зам} \cdot \left( 1 + 1,4 \cdot \frac{\overline{\Sigma_{a_{яч}}}}{\xi \Sigma_{a_{яч}}} \right), \text{ К.} \quad (3.1)$$

Сечения поглощения и рассеяния берутся при температуре замедлителя.

Сечения при температуре нейтронного газа определяются следующим образом:

$$\overline{\sigma_a}(T_{н.г.}) = \sigma_{a_0} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot f_a(T_{н.г.}) \cdot F(\chi_{zp}) \cdot \sqrt{\frac{293}{T_{н.г.}}}, \text{ барн;} \quad (3.2)$$

$$\overline{\sigma_f}(T_{н.г.}) = \sigma_{f_0} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot f_f(T_{н.г.}) \cdot F(\chi_{zp}) \cdot \sqrt{\frac{293}{T_{н.г.}}}, \text{ барн.} \quad (3.3)$$

Температура замедлителя определяется по формуле:

$$T_{зам} = \frac{t_{ex} + t_{блх}}{2} = \frac{277 + 313}{2} + 273 = 568 \text{ К.}$$

С учетом долей материалов и сечений, получаем усредненные сечения по ячейке:

$$\overline{\Sigma_{a_{яч}}} = \Sigma_{a_{UO_2}} \cdot \beta_{UO_2} + \Sigma_{a_{Сплава}} \cdot \beta_{Сплава} + \Sigma_{a_{H_2O}} \cdot \beta_{H_2O};$$

$$\overline{\Sigma_{a_{яч}}} = 2,300 \cdot 0,357 + 0,278 \cdot 0,034 + 0,022 \cdot 0,609 = 0,844 \text{ см}^{-1};$$

$$\overline{\xi \Sigma_{s_{яч}}} = \xi \Sigma_{a_{топл.}} \cdot \beta_{топл.} + \xi \Sigma_{a_{Сплава}} \cdot \beta_{Сплава} + \xi \Sigma_{a_{H_2O}} \cdot \beta_{H_2O}$$

$$\overline{\xi \Sigma_{s_{яч}}} = 0,022 \cdot 0,357 + 0,041 \cdot 0,034 + 1,350 \cdot 0,609 = 0,832 \text{ см}^{-1}.$$

Тогда температура нейтронного газа, определяемая по формуле (3.1), равна:

$$T_{н.г.}^{эфф} = 568 \cdot \left( 1 + 1,4 \cdot \frac{0,844}{0,832} \right) = 1375,134 \text{ К.}$$

Сечения взаимодействия при температуре нейтронного газа  $T_{н.г.}^{эфф} = 1375,134 \text{ К}$  ( $f_a(T_{н.г.}) = f_f(T_{н.г.}) = 0,885$ ) пересчитываются по формулам (2.9) и (2.10):

$$\sigma_a^{U^{235}} = 683 \cdot 0,884 \cdot 0,885 \cdot \sqrt{\frac{293}{1375,134}} = 246,648 \text{ барн};$$

$$\sigma_a^{U^{238}} = 2,71 \cdot 0,884 \cdot \sqrt{\frac{293}{1375,134}} = 1,106 \text{ барн};$$

$$\sigma_a^{O^{16}} = 0 \cdot 0,884 \cdot \sqrt{\frac{293}{1375,134}} = 0 \text{ барн};$$

$$\sigma_a^{Cr^{52}} = 3,1 \cdot 0,884 \cdot \sqrt{\frac{293}{1375,134}} = 1,265 \text{ барн};$$

$$\sigma_a^{Al^{27}} = 0,241 \cdot 0,884 \cdot \sqrt{\frac{293}{1375,134}} = 0,098 \text{ барн};$$

$$\sigma_a^{Ti^{48}} = 5,8 \cdot 0,884 \cdot \sqrt{\frac{293}{1375,134}} = 2,367 \text{ барн};$$

$$\sigma_a^{Ni^{59}} = 4,6 \cdot 0,884 \cdot \sqrt{\frac{293}{1375,134}} = 1,877 \text{ барн};$$

$$\sigma_a^{Fe^{56}} = 2,53 \cdot 0,884 \cdot \sqrt{\frac{293}{1375,134}} = 1,032 \text{ барн};$$

$$\sigma_f^{U^{235}} = 582 \cdot 0,884 \cdot 0,885 \cdot \sqrt{\frac{293}{1375,134}} = 210,174 \text{ барн}.$$

Макросечения элементов пересчитываются по формуле (2.11):

$$\Sigma_a^{U^{235}} = 246,648 \cdot 10^{-24} \cdot 4,56 \cdot 10^{21} = 1,125 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_a^{U^{238}} = 1,106 \cdot 10^{-24} \cdot 1,824 \cdot 10^{22} = 0,020 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_a^{O^{16}} = 0 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_a^{UO_2} = \Sigma_a^{U^{235}} + \Sigma_a^{U^{238}} + \Sigma_a^{O^{16}} = 1,125 + 0,020 + 0 = 1,145 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_a^{Cr^{52}} = 1,265 \cdot 10^{-24} \cdot 1,778 \cdot 10^{22} = 0,022 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_a^{Al^{27}} = 0,098 \cdot 10^{-24} \cdot 6,937 \cdot 10^{20} = 6,822 \cdot 10^{-5} \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_a^{Ti^{48}} = 2,367 \cdot 10^{-24} \cdot 2,255 \cdot 10^{21} = 0,005 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_a^{Ni^{59}} = 1,877 \cdot 10^{-24} \cdot 6,374 \cdot 10^{22} = 0,120 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_a^{Fe^{56}} = 1,032 \cdot 10^{-24} \cdot 2,255 \cdot 10^{21} = 0,002 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_a^{Сплава} = \Sigma_a^{Cr^{52}} + \Sigma_a^{Al^{27}} + \Sigma_a^{Ti^{48}} + \Sigma_a^{Ni^{59}} + \Sigma_a^{Fe^{56}};$$

$$\Sigma_a^{Сплава} = 0,022 + 6,822 \cdot 10^{-5} + 0,005 + 0,120 + 0,002 = 0,150 \text{ см}^{-1}.$$

С учетом долей материалов и сечений, получаем усредненные сечения по ячейке:

$$\overline{\Sigma_{a_{яч}}} = 1,145 \cdot 0,357 + 0,150 \cdot 0,034 + 0,022 \cdot 0,609 = 0,427 \text{ см}^{-1};$$

$$\overline{\xi \Sigma_{s_{яч}}} = 0,022 \cdot 0,357 + 0,041 \cdot 0,034 + 1,350 \cdot 0,609 = 0,832 \text{ см}^{-1}.$$

Точка пересечения спектров Ферми и Максвелла определяется как отношение макросечения поглощения к замедляющей способности:

$$f_{zp}(\chi_{zp}) = \frac{\overline{\Sigma_{a_{яч}}}}{\overline{\xi \Sigma_{s_{яч}}}} = \frac{0,427}{0,832} = 0,514.$$

Величина  $\chi_{гр} = E_{гр} / E_m$ , ( $E_m = kT_{н.г.}$ ) определяется графически или подбором из следующего трансцендентного уравнения:

$$f_{zp}(\chi_{zp}) = \frac{\chi_{гр}^2 e^{-\chi_{гр}}}{1 - (1 + \chi_{гр}) e^{-\chi_{гр}}} = \frac{\Sigma_a}{\xi \Sigma_s}. \quad (3.4)$$

Найденной величине  $f_{zp}(\chi_{zp})$  соответствует  $\chi_{гр} = 3,160$ .

$$F_{zp}(\chi_{zp}) \Big|_{\chi_{zp}=3,160} = 1,11.$$

С учетом множителя  $F_{zp}(\chi_{zp})$  сечения взаимодействия при температуре нейтронного газа  $T_{н.г.}^{эфф} = 1375,134 \text{ К}$  ( $f_a(T_{н.г.}) = f_f(T_{н.г.}) = 0,885$ ) пересчитываются по формулам (3.2) и (3.3):

$$\sigma_a^{U^{235}} = 683 \cdot 0,884 \cdot 0,885 \cdot \sqrt{\frac{293}{1375,134}} \cdot 1,11 = 273,779 \text{ барн};$$

$$\sigma_a^{U^{238}} = 2,71 \cdot 0,884 \cdot \sqrt{\frac{293}{1375,134}} \cdot 1,11 = 1,227 \text{ барн};$$

$$\sigma_a^{O^{16}} = 0 \cdot 0,884 \cdot \sqrt{\frac{293}{1375,134}} \cdot 1,11 = 0 \text{ барн};$$

$$\sigma_a^{Cr^{52}} = 3,1 \cdot 0,884 \cdot \sqrt{\frac{293}{1375,134}} \cdot 1,11 = 1,404 \text{ барн};$$

$$\sigma_a^{Al^{27}} = 0,241 \cdot 0,884 \cdot \sqrt{\frac{293}{1375,134}} \cdot 1,11 = 0,109 \text{ барн};$$

$$\sigma_a^{Ti^{48}} = 5,8 \cdot 0,884 \cdot \sqrt{\frac{293}{1375,134}} \cdot 1,11 = 2,627 \text{ барн};$$

$$\sigma_a^{Ni^{59}} = 4,6 \cdot 0,884 \cdot \sqrt{\frac{293}{1375,134}} \cdot 1,11 = 2,084 \text{ барн};$$

$$\sigma_a^{Fe^{56}} = 2,53 \cdot 0,884 \cdot \sqrt{\frac{293}{1375,134}} \cdot 1,11 = 1,146 \text{ барн};$$

$$\sigma_f^{U^{235}} = 582 \cdot 0,884 \cdot 0,885 \cdot \sqrt{\frac{293}{1375,134}} \cdot 1,11 = 233,294 \text{ барн}.$$

Все пересчитанные сечения для «горячего» реактора приведены в таблице Б.1 приложения Б.

Усредненные макросечения взаимодействия равны:

$$\overline{\Sigma_{a_{яч}}} = 1,271 \cdot 0,357 + 0,166 \cdot 0,034 + 0,022 \cdot 0,609 = 0,473 \text{ см}^{-1};$$

$$\overline{\xi \Sigma_{s_{яч}}} = 0,022 \cdot 0,357 + 0,041 \cdot 0,034 + 1,350 \cdot 0,609 = 0,832 \text{ см}^{-1}.$$

Точка пересечения спектров Ферми и Максвелла, соответствующая данному отношению макросечения поглощения к замедляющей способности:

$$f_{zp}(\chi_{zp}) = \frac{\overline{\Sigma_{a_{яч}}}}{\overline{\xi \Sigma_{s_{яч}}}} = \frac{0,473}{0,832} = 0,569 \text{ .}$$

Найденной величине  $f_{zp}(\chi_{zp})$  соответствует  $\chi_{гр} = 2,970$ . Поскольку найденное значение  $\chi_{гр} = 2,970$  практически совпадает с полученным ранее значение, то нет необходимости проведения перерасчета сечений.

При данных сечениях коэффициент размножения будет равен:

$$\varepsilon = 1,024;$$

$$\varphi = 0,900;$$

$$\theta = 0,944;$$

$$\eta = 2,026;$$

$$k_{\infty} = 1,763.$$

Эффективный коэффициент размножения для «горячего» реактора определяется аналогично (2.26):

$$k_{\text{эф}}^{\text{гор}} = \frac{k_{\infty}^{\text{гор}} e^{-B^2 \tau_{p \text{ гор}}}}{1 + B^2 L_{p \text{ гор}}^2}.$$

Для нахождения квадрата длины диффузии  $L_{p \text{ гор}}^2$  необходимо пересчитать  $L_{\text{зам}}^2$ , умножив значение для «холодного» реактора на соответствующую температурную поправку:

$$L_{\text{зам}}^2(T) = L_{\text{зам}}^2(T_0) \cdot \left( \frac{T}{T_0} \right)^{0,48}, \quad (3.5)$$

где  $T_0$  – температура для «холодного» реактора;

$T$  – средняя температура замедлителя;

$L_{\text{зам}}^2(T_0)$  – квадрат длины диффузии в замедлителе для «холодного» реактора.

Тогда:

$$L_{\text{зам}}^2(T) = 2,555^2 \cdot \left( \frac{568}{293} \right)^{0,48} = 8,972 \text{ см}^2.$$

Длина диффузии для решетки «горячего» реактора находится аналогично расчету «холодного» реактора по формуле (2.27):

$$L_p^2 = 2,995^2 \cdot (1 - 0,944) + 0,416^2 \cdot 0,944 = 0,664 \text{ см}^2.$$

Возраст нейтронов в замедлителе для «горячем» реакторе пересчитывается по формуле:

$$\tau_{зам.гор} = \frac{\tau_{зам.хол}}{\rho_{H_2O} \cdot \frac{S_{H_2O}}{S_{яч.}} \cdot \left[ 1 - \frac{S_{H_2O}}{S_{яч.}} \cdot (1 - \rho_{H_2O}) \right]} \text{ см}^2, \quad (3.6)$$

где  $\tau_{зам.хол}$  – возраст нейтронов в «холодном» реакторе, см<sup>2</sup>.

Подставив значения соответствующих параметров:

$$\tau_{зам.гор} = \frac{27,300}{0,737 \cdot \frac{103,401}{169,741} \cdot \left[ 1 - \frac{103,401}{169,741} \cdot (1 - 0,737) \right]} = 79,033 \text{ см}^2.$$

Возраст нейтронов в реакторе с учетом долей ядерного горючего, теплоносителя и конструкционных материалов рассчитывается по формуле (2.28):

$$\tau_p = 79,033 \cdot \left( \frac{169,741}{103,401} \right)^{0,5} = 101,260 \text{ см}^2.$$

Геометрический параметр для «горячего» реактора рассчитывается по формуле (2.29) и имеет значение:

$$B^2 = \left( \frac{\pi}{144,952} \right)^2 + \left( \frac{2,405}{92,635} \right)^2 = 1,144 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-2}.$$

Окончательно, эффективный коэффициент размножения «горячего» реактора равен:

$$k_{эф} = \frac{1,763 \cdot \exp(-1,144 \cdot 10^{-3} \cdot 101,260)}{1 + 1,144 \cdot 10^{-3} \cdot 0,664} = 1,569.$$

С учетом найденных значений эффективного коэффициента размножения для «холодного» и «горячего» реакторов можно определить температурный коэффициент реактивности ТКР по следующей формуле:

$$\rho_T = \frac{\Delta k_{эф}}{\Delta T} = \frac{k_{эф}^{гор} - k_{эф}^{хол}}{T_{зам.} - 293}; \quad (3.7)$$

Определяем температурный коэффициент реактивности:

$$\rho_T = \frac{\Delta k_{эф}}{\Delta T} = \frac{1,569 - 1,726}{568 - 293} = -5,710 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}.$$

Найденное значение ТКР лежит в допустимых пределах для реакторов типа ВВЭР.

Определим температурный эффект реактивности по отдельным элементам:

$$\Delta k_{\text{эф}}^{\text{доплер}} = k_{\text{эф}}^{568} - k_{\text{эф}}^{20} = 1,823 - 1,726 = 0,097 ;$$

$$\Delta k_{\text{эф}}^{H_2O} = k_{\text{эф}}^{568} - k_{\text{эф}}^{20} = 1,609 - 1,717 = -0,117 .$$

Таким образом суммарный ТЭР составляет:

$$\Delta k_{\text{эф}}^{\text{общий}} = \Delta k_{\text{эф}}^{H_2O} + \Delta k_{\text{эф}}^{\text{доплер}} = -0,117 + 0,097 = -0,019 .$$

### 3.2 Многогрупповой расчет, спектр и ценности нейтронов в активной зоне

Эффективным методом расчета спектра нейтронов является многогрупповой метод, основная идея которого состоит в том, что вся область энергий нейтронов делится на конечное число интервалов – групп.

В пределах каждой группы сечения ядерных процессов считаются не зависящими от энергии нейтронов.

Предполагается, что для каждой группы могут быть рассмотрено односкоростное кинетическое уравнение в диффузионно-возрастном приближении и сопряженное ему уравнение ценностей нейтронов, описывающее баланс нейтронов и ценностей в объеме реактора.

В дальнейшем будет принята следующая система обозначений:

$m$  – общее число энергетических групп;

$k, i, j$  – текущий индекс группы;

$\varepsilon_j$  – доля нейтронов группы «  $j$  » в спектре деления  $\int \varepsilon(U) dU = 1$ ;

$D$  – коэффициент диффузии нейтронов, см;

$\Sigma_s^k$  – 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 « $j$ ».

### 3.2.1 Пересчет концентраций

Пересчет концентраций для многогруппового расчета производится по формуле:

$$N_i = N_j \cdot \beta_j \quad (3.8)$$

где  $N_j$  – концентрация элемента, без учета его доли в ячейке;

$\beta_j$  – доля  $j$ -го элемента в ячейке.

Тогда, с учетом долей всех составляющих ячейки, концентрации элементов равны:

$N_{U^{235}} = 4,56 \cdot 10^{21} \cdot 0,357 = 1,629 \cdot 10^{21}$  ядер/см<sup>3</sup> – концентрация ядер  $U^{235}$  в топливе;

$N_{U^{238}} = 1,824 \cdot 10^{22} \cdot 0,357 = 6,516 \cdot 10^{21}$  ядер/см<sup>3</sup> – концентрация ядер  $U^{238}$  в топливе;

$N_O = 4,56 \cdot 10^{22} \cdot 0,357 = 1,629 \cdot 10^{22}$  ядер/см<sup>3</sup> – концентрация ядер  $O$  в топливе;

$N_O = 2,465 \cdot 10^{22} \cdot 0,609 = 1,502 \cdot 10^{22}$  ядер/см<sup>3</sup> – концентрация ядер  $O$  в теплоносителе;

$N_H = 4,931 \cdot 10^{22} \cdot 0,609 = 3,004 \cdot 10^{22}$  ядер/см<sup>3</sup> – концентрация ядер  $H$  в теплоносителе;

$N_{Cr} = 1,778 \cdot 10^{22} \cdot 0,034 = 5,974 \cdot 10^{20}$  ядер/см<sup>3</sup> – концентрация ядер  $Cr$  в оболочке ТВЭЛОВ;

$N_{Al} = 6,937 \cdot 10^{20} \cdot 0,034 = 2,331 \cdot 10^{19}$  ядер/см<sup>3</sup> – концентрация ядер  $Al$  в оболочке ТВЭЛОВ;

$N_{Ti} = 2,255 \cdot 10^{21} \cdot 0,034 = 7,576 \cdot 10^{19}$  ядер/см<sup>3</sup> – концентрация ядер  $Ti$  в оболочке ТВЭЛОВ;

$N_{Ni} = 6,374 \cdot 10^{22} \cdot 0,034 = 2,142 \cdot 10^{21}$  ядер/см<sup>3</sup> – концентрация ядер  $Ni$  в оболочке ТВЭЛОВ;

$N_{Fe} = 2,255 \cdot 10^{21} \cdot 0,034 = 7,576 \cdot 10^{19}$  ядер/см<sup>3</sup> – концентрация ядер  $Fe$  в оболочке ТВЭЛОВ.

### 3.2.1 Многогрупповой расчет

Для каждого элемента рассчитываются:

$$\Sigma_a^k = N_i \cdot (\sigma_c^k + \sigma_f^k) \text{ см}^{-1}; \quad (3.9)$$

$$\Sigma_3^k = N_i \cdot (\sigma_{3(e)}^k + \sigma_{in}^k - \sigma_{in}^{kk}) \text{ см}^{-1}; \quad (3.10)$$

$$\Sigma_{tr}^k = N_i \cdot (\sigma_e^k \cdot (1 - \mu_e) + \sigma_f^k + \sigma_{in}^{kk} + \sigma_c^k) \text{ см}^{-1}, \quad (3.11)$$

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;

$\mu_e$  – средний косинус угла рассеяния.

$$\Sigma_{y\theta}^k = \Sigma_a^k + \Sigma_3^k, \text{ см}^{-1}; \quad (3.12)$$

$$\Sigma^{i \rightarrow i+1} = N_i \cdot (\sigma_{3(e)}^k + \sigma_{in(i,i+1)}^k), \text{ см}^{-1}, \text{ при } k = i + 1; \quad (3.13)$$

$$\Sigma^{i \rightarrow i+k} = N_i \cdot \sigma_{in(i,i+1)}^k, \text{ см}^{-1}, \text{ при } k > i + 1. \quad (3.14)$$

Кроме того, необходимо учесть поправку на резонансную самоэкранировку:

$$\sigma_0 = \frac{\sum_{i=1}^{m-1} \sigma_{t_m} \cdot N_{m_i}}{N_c}, \text{ барн.} \quad (3.15)$$

где  $\sigma_{t_m}$ ,  $N_{m_i}$  – сечения и ядерная концентрация « $m$ » элемента.

В зависимости от найденных  $\sigma_0$  и температуры нейтронного газа выбираются поправки к сечениям  $f_i$ . С учетом поправок рассчитываются среднегрупповые значения сечений для данных элементов:

$$\overline{\sigma}_i = \sigma_i \cdot f(\sigma_0, T). \quad (3.16)$$

В качестве примера определения констант приводится расчет для 2-ой группы:

Для определения поправки на самоэкранировку *Fe* вычисляется:

$$\begin{aligned} \sigma_{0(2)}^{Fe} = & \frac{N_{U^{235}} \cdot \sigma_{t(2)}^{U^{235}} + N_O \cdot \sigma_{t(2)}^{O_{мол.}} + N_O \cdot \sigma_{t(2)}^{O_{вод.}} + N_H \cdot \sigma_{t(2)}^H}{N_{Fe}} + \\ & + \frac{N_{Cr} \cdot \sigma_{t(2)}^{Cr} + N_{Al} \cdot \sigma_{t(2)}^{Al} + N_{Ti} \cdot \sigma_{t(2)}^{Ti} + N_{Ni} \cdot \sigma_{t(2)}^{Ni} + N_{U^{238}} \cdot \sigma_{t(2)}^{U^{238}}}{N_{Fe}} \text{ барн,} \\ \sigma_{0(2)}^{Fe} = & \frac{1,629 \cdot 10^{21} \cdot 7,4 + 1,629 \cdot 10^{22} \cdot 1,45 + 1,502 \cdot 10^{22} \cdot 1,45 + 3,004 \cdot 10^{22} \cdot 1,65}{7,576 \cdot 10^{19}} + \\ & + \frac{5,974 \cdot 10^{20} \cdot 3,6 + 2,331 \cdot 10^{19} \cdot 2,2 + 7,576 \cdot 10^{19} \cdot 3,4}{7,576 \cdot 10^{19}} + \\ & + \frac{3,6 \cdot 10^{21} \cdot 10,9 + 6,516 \cdot 10^{21} \cdot 7,5}{7,576 \cdot 10^{19}} = 291,141 \text{ барн.} \end{aligned} \quad (3.17)$$

Поправки  $f_t$ ,  $f_c$ ,  $f_e$  для 2 группы равны 1.

Определяем уход из группы.

За счет замедления.

O:

$$\sigma_3^2 = \sigma_{3(e)}^2 + \sigma_{3(in)}^2 = \sigma_{3(e)}^2 + \sigma_{in}^2 - \sigma_{in(2,2)}^2 = 0,377 + 0 - 0 = 0,377 \text{ барн.}$$

$U^{235}$ :

$$\sigma_3^2 = \sigma_{3(e)}^2 + \sigma_{3(in)}^2 = \sigma_{3(e)}^2 + \sigma_{in}^2 - \sigma_{in(2,2)}^2 = 0,025 + 1,920 - 0,020 = 1,925 \text{ барн.}$$

$U^{238}$ :

$$\sigma_3^2 = \sigma_{3(e)}^2 + \sigma_{3(in)}^2 = \sigma_{3(e)}^2 + \sigma_{in}^2 - \sigma_{in(2,2)}^2 = 0,025 + 2,510 - 0,020 = 2,515 \text{ барн.}$$

Cr:

$$\sigma_3^2 = \sigma_{3(e)}^2 + \sigma_{3(in)}^2 = \sigma_{3(e)}^2 + \sigma_{in}^2 - \sigma_{in(2,2)}^2 = 0,098 + 1,250 - 0,070 = 1,278 \text{ барн.}$$

*Al:*

$$\sigma_3^2 = \sigma_{3(e)}^2 + \sigma_{3(in)}^2 = \sigma_{3(e)}^2 + \sigma_{in}^2 - \sigma_{in(2,2)}^2 = 0,148 + 0,750 - 0,050 = 0,848 \text{ барн.}$$

*Ti:*

$$\sigma_3^2 = \sigma_{3(e)}^2 + \sigma_{3(in)}^2 = \sigma_{3(e)}^2 + \sigma_{in}^2 - \sigma_{in(2,2)}^2 = 0,105 + 1,150 - 0,050 = 1,250 \text{ барн.}$$

*Ni:*

$$\sigma_3^2 = \sigma_{3(e)}^2 + \sigma_{3(in)}^2 = \sigma_{3(e)}^2 + \sigma_{in}^2 - \sigma_{in(2,2)}^2 = 0,064 + 1,30 - 0,030 = 1,334 \text{ барн.}$$

*Fe:*

$$\sigma_3^2 = \sigma_{3(e)}^2 + \sigma_{3(in)}^2 = \sigma_{3(e)}^2 + \sigma_{in}^2 - \sigma_{in(2,2)}^2 = 0,082 + 1,350 - 0,120 = 1,312 \text{ барн.}$$

*H:*

$$\sigma_3^2 = \sigma_{3(e)}^2 + \sigma_{3(in)}^2 = \sigma_{3(e)}^2 + \sigma_{in}^2 - \sigma_{in(2,2)}^2 = 0,082 + 1,350 - 0,120 = 1,312 \text{ барн.}$$

За счет поглощения.

*O:*

$$\sigma_a^2 = \sigma_c^2 + \sigma_f^2 = 0,074 + 0 = 0,074 \text{ барн.}$$

*U<sup>235</sup>:*

$$\sigma_a^2 = \sigma_c^2 + \sigma_f^2 = 0,030 + 1,150 = 1,180 \text{ барн.}$$

*U<sup>238</sup>:*

$$\sigma_a^2 = \sigma_c^2 + \sigma_f^2 = 0,010 + 0,580 = 0,590 \text{ барн.}$$

*Cr:*

$$\sigma_a^2 = \sigma_c^2 + \sigma_f^2 = 0,003 + 0 = 0,003 \text{ барн.}$$

*Al:*

$$\sigma_a^2 = \sigma_c^2 + \sigma_f^2 = 0,023 + 0 = 0,023 \text{ барн.}$$

*Ti:*

$$\sigma_a^2 = \sigma_c^2 + \sigma_f^2 = 0,023 + 0 = 0,023 \text{ барн.}$$

*Ni:*

$$\sigma_a^2 = \sigma_c^2 + \sigma_f^2 = 0,190 + 0 = 0,190 \text{ барн.}$$

*Fe*:

$$\sigma_a^2 = \sigma_c^2 + \sigma_f^2 = 0,005 + 0 = 0,005 \text{ барн.}$$

*H*:

$$\sigma_a^2 = \sigma_c^2 + \sigma_f^2 = 0 + 0 = 0 \text{ барн.}$$

Транспортные параметры:

*O*:

$$\sigma_{tr}^2 = \sigma_e^2 \cdot (1 - \mu_e^2) + \sigma_a^2 + \sigma_{in}^2 = 1,352 \cdot (1 - 0,260) + 0,074 + 0 = 2,994 \text{ барн.}$$

*U*<sup>235</sup>:

$$\sigma_{tr}^2 = \sigma_e^2 \cdot (1 - \mu_e^2) + \sigma_a^2 + \sigma_{in}^2 = 4,300 \cdot (1 - 0,800) + 1,180 + 1,920 = 3,960 \text{ барн.}$$

*U*<sup>238</sup>:

$$\sigma_{tr}^2 = \sigma_e^2 \cdot (1 - \mu_e^2) + \sigma_a^2 + \sigma_{in}^2 = 4,4 \cdot (1 - 0,8) + 0,590 + 2,51 = 3,980 \text{ барн.}$$

*Cr*:

$$\sigma_{tr}^2 = \sigma_e^2 \cdot (1 - \mu_e^2) + \sigma_a^2 + \sigma_{in}^2 = 2,350 \cdot (1 - 0,670) + 0,003 + 1,250 = 2,029 \text{ барн.}$$

*Al*:

$$\sigma_{tr}^2 = \sigma_e^2 \cdot (1 - \mu_e^2) + \sigma_a^2 + \sigma_{in}^2 = 1,430 \cdot (1 - 0,570) + 0,0230 + 0,750 = 1,388 \text{ барн.}$$

*Ti*:

$$\sigma_{tr}^2 = \sigma_e^2 \cdot (1 - \mu_e^2) + \sigma_a^2 + \sigma_{in}^2 = 2,240 \cdot (1 - 0,660) + 0,023 + 1,150 = 1,935 \text{ барн.}$$

*Ni*:

$$\sigma_{tr}^2 = \sigma_e^2 \cdot (1 - \mu_e^2) + \sigma_a^2 + \sigma_{in}^2 = 2,110 \cdot (1 - 0,730) + 0,190 + 1,300 = 2,060 \text{ барн.}$$

*Fe*:

$$\sigma_{tr}^2 = \sigma_e^2 \cdot (1 - \mu_e^2) + \sigma_a^2 + \sigma_{in}^2 = 2,450 \cdot (1 - 0,720) + 0,005 + 1,350 = 2,041 \text{ барн.}$$

*H*:

$$\sigma_{tr}^2 = \sigma_e^2 \cdot (1 - \mu_e^2) + \sigma_a^2 + \sigma_{in}^2 = 1,650 \cdot (1 - 0,667) + 0 + 0 = 0,549 \text{ барн.}$$

В результате для 2-й группы:

$$\Sigma_a^2 = \Sigma_{aU5}^2 + \Sigma_{aU8}^2 + \Sigma_{aO}^2 + \Sigma_{aCr}^2 + \Sigma_{aAl}^2 + \Sigma_{aTi}^2 + \Sigma_{aNi}^2 + \Sigma_{aFe}^2 + \Sigma_{aH}^2 + \Sigma_{aO}^2 \text{ см}^{-1}.$$

$$\sum_a^2 = 0,002 + 0,004 + 0,001 + 1,792 \cdot 10^{-6} + 5,362 \cdot 10^{-7} + 1,743 \cdot 10^{-6} + 4,069 \cdot 10^{-4} + 3,788 \cdot 10^{-7} + 0 + 0,001 = 0,008 \text{ см}^{-1}.$$

$$\sum_3^2 = \sum_{3U5}^2 + \sum_{3U8}^2 + \sum_{3O}^2 + \sum_{3Cr}^2 + \sum_{3Al}^2 + \sum_{3Ti}^2 + \sum_{3Ni}^2 + \sum_{3Fe}^2 + \sum_{3H}^2 + \sum_{3O}^2 \text{ см}^{-1}.$$

$$\sum_3^2 = 0,003 + 0,016 + 0,006 + 7,634 \cdot 10^{-4} + 1,977 \cdot 10^{-5} + 9,357 \cdot 10^{-5} + 2,857 \cdot 10^{-3} + 9,940 \cdot 10^{-5} + 0,041 + 0,006 = 0,076 \text{ см}^{-1}.$$

$$\sum_{tr}^2 = \sum_{trU5}^2 + \sum_{trU8}^2 + \sum_{trO}^2 + \sum_{trCr}^2 + \sum_{trAl}^2 + \sum_{trTi}^2 + \sum_{trNi}^2 + \sum_{trFe}^2 + \sum_{trH}^2 + \sum_{trO}^2 \text{ см}^{-1}.$$

$$\sum_{tr}^2 = 0,006 + 0,026 + 0,017 + 1,212 \cdot 10^{-3} + 3,235 \cdot 10^{-5} + 1,466 \cdot 10^{-4} + 4,411 \cdot 10^{-3} + 1,546 \cdot 10^{-4} + 0,017 + 0,016 = 0,088 \text{ см}^{-1}.$$

$$D_2 = \frac{1}{3 \cdot \sum_{tr}^2} = \frac{1}{3 \cdot 0,017} = 3,767 \text{ см}.$$

$$\delta = \frac{0,710}{\sum_{tr}} \text{ см}.$$

$$\delta_2 = \frac{0,710}{0,088} = 8,029 \text{ см}.$$

$$B^2 = \left( \frac{\pi}{H + 2 \cdot \delta} \right)^2 + \left( \frac{2,405}{R + \delta} \right)^2 \text{ см}^{-2}.$$

$$B^2 = \left( \frac{\pi}{120,951 + 2 \cdot 8,029} \right)^2 + \left( \frac{2,405}{80,634 + 8,029} \right)^2 = 1,262 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-2}.$$

Результаты сведены в таблицу В.1 приложения В.

Рассчитаем поток и ценность для 2-й группы:

$$I_2 = \frac{\varepsilon_2 + \sum_3^{1 \rightarrow 2} \cdot I_1}{B_2^2 \cdot D_2 + \sum_a^2 + \sum_3^2} = \frac{0,098 + 0,017 \cdot 0,221}{1,262 \cdot 10^{-3} \cdot 3,767 + 0,008 + 0,076} = 1,147,$$

$$I_2^+ = \frac{\nu_f^2 \cdot \sum_f^2 + \sum_{i=3}^{26} \sum_3^{2 \rightarrow i} \cdot I_i^+}{B_2^2 \cdot D_2 + \sum_a^2 + \sum_3^2} = \frac{0,017 + 0,101}{1,262 \cdot 10^{-3} \cdot 3,767 + 0,008 + 0,076} = 1,327.$$

При расчете потоков и ценностей учитываются переходы нейтронов в различные группы. Проверка потоков сводится к проверке условия  $K_{\phi} = K_{\phi}^+$ ,

$$\text{т.е. } \sum_{j=1}^m \nu_f^j \cdot \sum_f^j \cdot I_j = \sum_{j=1}^m \varepsilon_j \cdot I_j^+.$$

Проверка показала:

$$\sum_{j=1}^m \nu_f^j \cdot \Sigma_f^j \cdot I_j = 1,3256,$$

$$\sum_{j=1}^m \varepsilon_j \cdot I_j^+ = 1,3256.$$

Это означает, что  $K_{эф} = K_{эф}^+$ . Следовательно, все значения потоков и ценностей нейтронов в активной зоне были рассчитаны верно.

### 3.2.3 Определение параметров двухгруппового расчета

Рассчитанные спектры потоков и ценностей нейтронов в активной зоне позволяют составить константы для последующего расчета пространственного распределения нейтронных потоков.

При этом выделяется тепловая группа – последняя группа, а все остальные группы объединяются в одну группу быстрых нейтронов, т.е. соответствующие потоки и ценности определяются так:

$$\Phi_T = \Phi_{26} = 0,413 \text{ и } \Phi_T^+ = \Phi_{26}^+ = 1,980;$$

$$\Phi_B = \sum_{i=1}^{25} \Phi_i = 30,001 \text{ и } \Phi_B^+ = \sum_{i=1}^{25} \Phi_i^+ = 36,178.$$

Усредненные константы рассчитываются по формулам:

$$D_B = \frac{\sum_{i=1}^{25} D_i \cdot \Phi_i \cdot \Phi_i^+}{\sum_{i=1}^{25} \Phi_i \cdot \Phi_i^+} = 0,056 \text{ см}; \quad D_T = D_{26} = 0,369 \text{ см};$$

$$\Sigma_{yg}^B = \frac{\sum_{k=1}^{25} \Phi_k^+ \cdot \left( (\Sigma_a^k + \Sigma_3^k) \cdot \Phi_k - \sum_{i=1}^{k-1} \Sigma_3^{ik} \cdot \Phi_i \right)}{\sum_{k=1}^{25} \Phi_k \cdot \Phi_k^+} = 1,562 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_a^T = \Sigma_a^{26} = 0,465 \text{ см}^{-1};$$

$$(\nu_f \cdot \Sigma_f)_B = \frac{\sum_{i=1}^{25} \nu_f^i \cdot \Sigma_f^i \cdot \Phi_i \cdot \Phi_i^+}{\sum_{i=1}^{25} \Phi_i \cdot \Phi_i^+} = 1,327 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1};$$

$$(\nu_f \cdot \Sigma_f)_T = \nu_f^{26} \cdot \Sigma_f^{26} = 0,922 \text{ см}^{-1};$$

$$\tau = \frac{D_B}{\Sigma_{yB}^B - (\nu_f \cdot \Sigma_f)_B} = \frac{0,056}{1,562 \cdot 10^{-3} - 1,327 \cdot 10^{-3}} = 237,027 \text{ см}^2;$$

$$L^2 = \frac{D_T}{\Sigma_a^T} = \frac{0,369}{0,465} = 0,794 \text{ см}^2.$$

### 3.3 Расчёт нуклидного состава

В результате работы ядерного реактора протекают процессы, приводящие к изменению нуклидного состава реакторных материалов. Изменение нуклидного состава топлива связано с уменьшением делящегося материала, вследствие его выгорания, воспроизводства ядерного топлива, а также образования отравляющих продуктов и шлаков.

#### 3.3.1 Выгорание ядерного топлива

При изменении содержания делящихся изотопов основную роль играют  $U^{235}$  и  $Pu^{239}$ . Чтобы определить концентрации  $U^{235}$  и  $Pu^{239}$  необходимо значение глубины выгорания. Среднюю глубину выгорания приближенно оценим по формуле:

$$\bar{z} = 1,34 \cdot 10^{-1} \cdot \frac{P \cdot t}{C_{U^{235}}}, \text{ МВт} \cdot \text{сут/т},$$

где  $P = \frac{N}{m_{UO_2}}$  – удельная мощность;

$t$  – время работы ядерного реактора (сутки).

Рассчитаем объём топлива в активной зоне:

$$V_{\text{мон}} = S_{\text{мон}} \cdot H_{\text{а.з.}} \cdot n_{\text{ТВС}} \cdot n_{\text{мвэл}} = 0,594 \cdot 120,951 \cdot 120 \cdot 102 = 8,801 \cdot 10^5 \text{ см}^3,$$

где  $n_k$  – число топливных кассет в активной зоне.

Масса топлива равна:

$$m_{\text{UO}_2} = \rho_{\text{UO}_2} V_{\text{мон}} = \frac{10,200 \cdot 8,801 \cdot 10^5}{10^6} = 8,977 \text{ т};$$

$$P = \frac{N}{m_{\text{UO}_2}} = \frac{175}{9,052} = 19,495 \text{ МВт/т.}$$

Определим среднюю плотность потока нейтронов по реактору:

$$\Phi = \frac{N}{\sum_f \text{яч} \cdot E_{\text{дел.}} \cdot V_{\text{а.з.}}} = \frac{1,750 \cdot 10^8}{0,412 \cdot 3,200 \cdot 10^{-11} \cdot 2,471 \cdot 10^6} = 5,370 \cdot 10^{12}, \text{ нейтрон/см}^2 \cdot \text{с.}$$

Для определения величины выгорания зададим время работы реактора: 900 суток.

$$z = 1,34 \cdot 10^{-1} \cdot \frac{19,495 \cdot 900}{0,2} = 11755,318 \text{ МВт} \cdot \text{сут/т.}$$

Определим концентрацию  $U^{235}$  при выгорании:

$$N_{U^{235}} = N_0^{U^{235}} \cdot e^{-\sigma_a^{U^{235}} \cdot \Phi \cdot t} = 4,560 \cdot 10^{21} \cdot e^{-273,779 \cdot 10^{-24} \cdot 5,825 \cdot 10^{12} \cdot 900 \cdot 24 \cdot 3600} = 1,320 \cdot 10^{21} \text{ ядер/см}^3;$$

Глубина выгорания составит:

$$z = \frac{N_0^{U^{235}} - N_{U^{235}}}{N_0^{U^{235}}} = \frac{4,560 \cdot 10^{21} - 1,320 \cdot 10^{21}}{4,560 \cdot 10^{21}} = 0,711.$$

Изменение концентрации  $Pu^{239}$  в процессе работы реактора:

$$N_{Pu^{239}} = \frac{N_{U^{238}} \cdot \sigma_a^{U^{238}}}{\sigma_a^{Pu^{239}} - \sigma_a^{U^{238}}} \cdot \left( e^{-\sigma_a^{U^{238}} \cdot \Phi \cdot t} - e^{-\sigma_a^{Pu^{239}} \cdot \Phi \cdot t} \right) = 2,534 \cdot 10^{19} \text{ ядер/см}^3.$$

Определим концентрацию  $Pu^{239}$ :

$$C_{Pu^{239}} = \frac{N_{Pu^{239}}}{N_{U^{238}}} = \frac{2,534 \cdot 10^{19}}{1,824 \cdot 10^{22}} = 5,064 \cdot 10^{-4}.$$

### 3.3.2 Коэффициент воспроизводства

Для оценки относительной интенсивности образования вторичного вещества служит коэффициент воспроизводства, который определяется как отношение числа образовавшихся ядер плутония к числу исчезнувших ядер:

$$\chi_{Pu^{239}} = \frac{\sigma_a^{U^{238}} \cdot N_{U^{238}}}{\sigma_a^{U^{235}} \cdot N_{U^{235}}} + \mu \cdot \eta_{N_{U^{235}}} \cdot (1 - \varphi);$$

$$\chi_{Pu^{239}} = \frac{1,227 \cdot 1,824 \cdot 10^{22}}{273,779 \cdot 4,560 \cdot 10^{21}} + 1,024 \cdot 2,026 \cdot (1 - 0,900) = 0,226 .$$

### 3.3.3 Отравление реактора

Отравлением называется изменение реактивности вследствие поглощения нейтронов короткоживущими ядрами. Важнейшим из отравляющих продуктов является  $Xe^{135}$ , имеющий очень большое сечение поглощения ( $\sigma_{Xe} = 2,75 \cdot 10^6$  барн). После  $Xe^{135}$  наиболее сильным из вредных поглотителей нейтронов является изотоп  $Sm^{149}$ . Самарий обладает большим сечением поглощения, достигающим значения  $\sigma_{Sm} = 5,92 \cdot 10^4$  барн. Вследствие значительной концентрации и высокого сечения поглощения  $Sm^{149}$  по степени и характеру воздействия на реактивность занимает особое положение среди шлаков и скорее приближается к отравляющим продуктам. Поэтому поглощение нейтронов самарием часто называют отравлением.

### 3.3.4 Определение равновесных ядерных концентраций $Xe$ и $Sm$

$$N_I^{cm.} = \frac{\omega_I \cdot \Sigma_f^{U^{235}} \cdot \Phi}{\lambda_I} = \frac{0,056 \cdot 1,154 \cdot 5,370 \cdot 10^{12}}{2,874 \cdot 10^{-5}} = 1,207 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3};$$

$$N_{Xe}^{cm.} = \frac{(\omega_I + \omega_{Xe}) \cdot \Sigma_f^{U^{235}} \cdot \Phi}{(\lambda_{Xe} + \sigma_a^{Xe} \cdot \Phi)} ;$$

$$N_{Xe}^{cm.} = \frac{(0,056 + 0,003) \cdot 1,154 \cdot 5,370 \cdot 10^{12}}{(2,093 \cdot 10^{-5} + 2,75 \cdot 10^{-18} \cdot 5,370 \cdot 10^{12})} = 1,024 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3};$$

$$N_{Pm}^{cm.} = \frac{\omega_{Pm} \cdot \Sigma_f^{U^{235}} \cdot \Phi}{\lambda_{Pm}} = \frac{0,013 \cdot 1,154 \cdot 5,370 \cdot 10^{12}}{4,097 \cdot 10^{-6}} = 1,966 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3};$$

$$N_{Sm}^{cm.} = \frac{\omega_{Pm} \cdot \Sigma_f^{U^{235}}}{\sigma_a^{Sm}} = \frac{0,013 \cdot 1,154}{5,920 \cdot 10^{-20}} = 2,534 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}.$$

### 3.3.5 Определение накопления $I$ , $Xe$ , $Pm$ , $Sm$ при работе ядерного реактора на стационарной мощности

$$N_I(t) = N_I^{cm} \cdot (1 - e^{-\lambda_I \cdot t});$$

$$N_{Xe}(t) = N_{Xe}^{cm} \cdot \left\{ 1 + \frac{1}{\omega_I + \omega_{Xe}} \cdot \left( \frac{\omega_I \cdot \lambda_I}{\lambda_{Xe} - \lambda_I + \sigma_a^{Xe} \cdot \Phi} - w_{Xe} \right) e^{-(\lambda_{Xe} + \sigma_a^{Xe} \cdot \Phi) \cdot t} \right\} -$$

$$- N_{Xe}^{cm} \cdot \left\{ \frac{\omega_I}{\omega_I + \omega_{Xe}} \cdot \left( \frac{\lambda_{Xe} + \sigma_a^{Xe} \cdot \Phi}{\lambda_{Xe} - \lambda_I + \sigma_a^{Xe} \cdot \Phi} \right) \cdot e^{-\lambda_I \cdot t} \right\};$$

$$N_{Pm}(t) = N_{Pm}^{cm} \cdot (1 - e^{-\lambda_{Pm} \cdot t});$$

$$N_{Sm}(t) = N_{Sm}^{cm} \cdot \left\{ 1 - e^{-\sigma_a^{Sm} \cdot \Phi \cdot t} \right\} - N_{Sm}^{cm} \cdot \frac{1}{1 - \frac{\lambda_{Pm}}{\sigma_a^{Sm} \cdot \Phi}} \left\{ e^{-\lambda_{Pm} \cdot t} - e^{-\sigma_a^{Sm} \cdot \Phi \cdot t} \right\}.$$

Изменение концентраций  $I$ ,  $Xe$ ,  $Pm$ ,  $Sm$  в любой момент времени показано на рисунке Г.1 и Г.2 (приложение Г).

### 3.3.6 Определение потери реактивности при отравлении $Xe$ и $Sm$ в любой момент времени до установления стационарного значения

Для реактора на тепловых нейтронах потеря реактивности за счет отравления:

$$\rho_{Xe}(t) = -\theta \frac{\sigma_a^{Xe} \cdot N_{Xe}(t)}{\sum_a U^{235}} ;$$

$$\rho_{Xe}^{cm.} = -\theta \cdot \frac{N_{Xe}^{cm.} \cdot \sigma_a^{Xe}}{\sum_a U^{235}} = -0,944 \cdot \frac{1,024 \cdot 10^{16} \cdot 2,75 \cdot 10^{-18}}{1,271} = -0,021 ;$$

$$\rho_{Sm}(t) = -\theta \frac{\sigma_a^{Sm} \cdot N_{Sm}(t)}{\sum_a U^{235}} ;$$

$$\rho_{Sm}^{cm.} = -\theta \cdot \frac{N_{Sm}^{cm.} \cdot \sigma_a^{Sm}}{\sum_a U^{235}} = -0,944 \cdot \frac{2,534 \cdot 10^{17} \cdot 5,92 \cdot 10^{-20}}{1,271} = -0,011.$$

Определим запас реактивности на начало кампании для «горячего» реактора. По определению, запас реактивности – максимально возможная реактивность при полностью извлечённых поглотителях:

$$\rho_{зан} = \frac{k_{эф} - 1}{k_{эф}} = \frac{1,569 - 1}{1,569} = 0,363 .$$

Определим величину стационарного отравления ксеноном:

$$q_{cm}^{Xe} = \frac{\sigma_a^{Xe} \cdot N_{Xe}^{cm.}}{\sum_a U^{235}} = \frac{2,75 \cdot 10^{-18} \cdot 1,024 \cdot 10^{16}}{1,271} = 0,021 .$$

$$\rho_{Xe}(t) = \rho_{Xe}^{cm.} \cdot \left[ \frac{\lambda_{Xe} + \sigma_a^{Xe} \cdot \Phi}{\lambda_{Xe} - \lambda_I} (e^{-\lambda_I t} \cdot e^{-\lambda_{Xe} t}) + e^{-\lambda_{Xe} t} \right] ;$$

$$t_{\ddot{y}.y.}^{\max} = \frac{1}{\lambda_I - \lambda_{Xe}} \cdot \ln \left[ \frac{\lambda_I}{\lambda_{Xe}} \cdot \frac{\lambda_{Xe} + \sigma_a^{Xe} \cdot \Phi}{\lambda_I + \sigma_a^{Xe} \cdot \Phi} \right] ;$$

$$N_{Sm}(t) = N_{Sm}^{cm.} + N_{Pm}^{cm.} \cdot (1 - e^{-\lambda_{Pm} t}) ;$$

$$\rho_{Sm}(t) = -\theta \frac{\sigma_a^{Sm} \cdot N_{Sm}(t)}{\Sigma_a^{U^{235}}};$$

### 3.3.7 Определение изменения реактивности после остановки реактора

$$\rho_{Xe}(t) = \rho_{Xe}^{cm.} \cdot \left[ \frac{\lambda_{Xe} + \sigma_a^{Xe} \cdot \Phi}{\lambda_{Xe} - \lambda_I} (e^{-\lambda \cdot t} \cdot e^{-\lambda_{Xe} \cdot t}) + e^{-\lambda_{Xe} \cdot t} \right];$$

$$N_{Sm}(t) = N_{Sm}^{cm.} + N_{Pm}^{cm.} \cdot (1 - e^{-\lambda_{Pm} \cdot t});$$

$$\rho_{Sm}(t) = -\theta \frac{\sigma_a^{Sm} \cdot N_{Sm}(t)}{\Sigma_a^{U^{235}}}.$$

Изменение реактивности после останова ядерного реактора показано на рисунке Г.3 и Г.4 (приложение Г).

### 3.3.8 Определение времени достижения полной глубины йодной ямы и прометиевого провала

$$t_{й.я.}^{max} = \frac{1}{2,874 \cdot 10^{-5} - 2,093 \cdot 10^{-5}} \cdot \ln \left[ \frac{2,874 \cdot 10^{-5}}{2,093 \cdot 10^{-5}} \cdot \frac{2,093 \cdot 10^{-5} + 2,75 \cdot 10^{-18} \cdot 5,370 \cdot 10^{12}}{2,874 \cdot 10^{-5} + 2,75 \cdot 10^{-18} \cdot 5,370 \cdot 10^{12}} \right] = 15270,722 =$$

$$= 4,242 \text{ ч};$$

$$t_{n.n.}^{yсм.} = \frac{10^{15}}{\Phi} = \frac{10^{15}}{5,370 \cdot 10^{12}} = 186,234 \text{ сут.}$$

### 3.3.9 Шлакование реактора

К шлакам относятся все стабильные, а также долгоживущие радиоактивные продукты деления.

Все шлаки делят на три группы в зависимости от величины сечения поглощения (для определения потерь на шлаках необходимо знать величину

выгорания  $z$ ,  $z = 0,117$  МВт·сут/Т):

1. К первой группе шлаков относятся сильно поглощающие шлаки, для которых  $\sigma_a^i \gg \sigma_a^{U^{235}} \approx 700$  барн ( $Sm^{149}$ ,  $Gd^{157}$ ,  $Eu^{155}$ ,  $Cd^{113}$ ). Относительное поглощение в шлаках первой группы равно:

$$q'_{шл1} = 1,510 \cdot 10^{-2};$$

2. Ко второй группе относятся шлаки, для которых  $\sigma_a^i \approx \sigma_a^{U^{235}}$  ( $Kr^{83}$ ,  $Xe^{131}$ ,  $Nd^{143}$ ,  $Sm^{152}$ ,  $Eu^{153}$ ):

$$q'_{шл2} = 4,14 \cdot 10^{-2} \cdot z = 4,14 \cdot 10^{-2} \cdot 0,117 = 4,415 \cdot 10^{-3};$$

3. К третьей группе относятся все остальные шлаки со слабым поглощением  $\sigma_a^i < \sigma_a^{U^{235}}$  ( $Kr^{82}$ ,  $Mo^{95}$ ,  $Ag^{100}$ ,  $I^{127}$ ,  $I^{129}$ ,  $Cs^{132}$ ):

$$q'_{шл3} = 1,14 \cdot 10^{-2} \cdot z = 1,14 \cdot 10^{-2} \cdot 0,117 = 1,216 \cdot 10^{-3}.$$

Суммарное поглощение тепловых нейтронов шлаками всех групп:

$$q_{шл} = q'_{шл1} + q'_{шл2} + q'_{шл3} = (1,51 + 0,442 + 0,122) \cdot 10^{-2} = 2,073 \cdot 10^{-2}.$$

### 3.3.10 Расчёт реактора в конце кампании

В результате изменений, которые происходят в изотопическом составе активной зоны в процессе работы реактора, меняется коэффициент размножения для бесконечной среды  $k_\infty$ , квадрат длины диффузии  $L^2$  и, следовательно, эффективный коэффициент размножения  $k_{эф}$ . Будем считать, что  $\varphi$  и  $\mu$  изменяются незначительно.

В силу того, что температурный коэффициент отрицательный, то расчёты проводятся для «горячего» реактора.

Коэффициент размножения на тепловых нейтронах в конце кампании:

$$\eta_{к.к.} = \frac{\nu_f^{U^{235}} \cdot \sigma_f^{U^{235}} \cdot N_{к.к.}^{U^{235}} + \nu_f^{Pu^{239}} \cdot \sigma_f^{Pu^{239}} \cdot N_{к.к.}^{Pu^{239}}}{\sigma_a^{U^{235}} \cdot N_{к.к.}^{U^{235}} + \sigma_a^{U^{238}} \cdot N_{к.к.}^{U^{238}} + \sigma_a^{Pu^{239}} \cdot N_{к.к.}^{Pu^{239}}} =$$

$$= \frac{2,42 \cdot 233,294 \cdot 1,320 \cdot 10^{21} + 2,87 \cdot 417,684 \cdot 2,534 \cdot 10^{19}}{273,779 \cdot 1,320 \cdot 10^{21} + 1,227 \cdot 1,823 \cdot 10^{21} + 417,684 \cdot 2,534 \cdot 10^{19}} = 1,943.$$

Расчёт коэффициента использования тепловых нейтронов в конце кампании ведётся по прежней методике, но предварительно вычисляются новые сечения с учётом изменившегося изотопного состава:

$$\Sigma_a^{wl} = q_{wl} \cdot \Sigma_a^{U^{235}} = 5,262 \cdot 10^{-2} \cdot 0,361 = 0,019 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_a^{Xe} = q_{cm}^{Xe} \cdot \Sigma_a^{U^{235}} = 2,141 \cdot 10^{-2} \cdot 0,361 = 0,008 \text{ см}^{-1}.$$

Макроскопическое сечение поглощения в топливе:

$$\begin{aligned} \Sigma_a^{UO_2} &= (\sigma_a^{U^{235}} \cdot N_{\kappa.\kappa.}^{U^{235}} + \sigma_a^{U^{238}} \cdot N_{\kappa.\kappa.}^{U^{238}} + \sigma_a^{Pu^{239}} \cdot N_{\kappa.\kappa.}^{Pu^{239}}) \cdot 10^{-24} + \Sigma_a^{wl} + \Sigma_a^{Xe} = \\ &= (273,779 \cdot 1,320 \cdot 10^{21} + 1,227 \cdot 1,823 \cdot 10^{21} + 417,684 \cdot 2,534 \cdot 10^{19}) \cdot 10^{-24} + \\ &\quad + 0,008 + 0,019 = 0,414 \text{ см}^{-1}. \end{aligned}$$

Макроскопическое сечение поглощения фиктивного блока:

$$\Sigma_{a_{\phi.\delta.}} = \frac{1}{S} \cdot \sum_{i=1}^m \Sigma_{a_{\phi.\delta.}} \cdot S_i = 0,393 \text{ см}^{-1};$$

Аналогично проведём расчёты для транспортного макроскопического сечения:

$$\Sigma_{tr}^{wl} = q_{wl} \cdot \Sigma_{tr}^{U^{235}} = 5,262 \cdot 10^{-2} \cdot 0,361 = 0,020 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_{tr}^{Xe} = q_{cm}^{Xe} \cdot \Sigma_{tr}^{UO_2} = 2,141 \cdot 10^{-2} \cdot 0,361 = 0,008 \text{ см}^{-1}.$$

$$\begin{aligned} \Sigma_{tr}^{UO_2} &= (\sigma_{tr}^{U^{235}} \cdot N_{\kappa.\kappa.}^{U^{235}} + \sigma_{tr}^{U^{238}} \cdot N_{\kappa.\kappa.}^{U^{238}} + \sigma_{tr}^{Pu^{239}} \cdot N_{\kappa.\kappa.}^{Pu^{239}}) \cdot 10^{-24} + \Sigma_{tr}^{wl} + \Sigma_{tr}^{Xe} = \\ &= (288,779 \cdot 1,320 \cdot 10^{21} + 10,227 \cdot 1,823 \cdot 10^{21} + 427,184 \cdot 2,534 \cdot 10^{19}) \cdot 10^{-24} + \\ &\quad + 0,020 + 0,008 = 0,764 \text{ см}^{-1}. \end{aligned}$$

$$\Sigma_{tr_{\phi.\delta.}} = \frac{1}{S} \cdot \sum_{i=1}^m \Sigma_{tr_{\phi.\delta.}} \cdot S_i = 0,814 \text{ см}^{-1};$$

С учётом полученных значений аналогично рассчитываются значения  $k_{\infty}$  и  $k_{\phi}$ . В результате коэффициент размножения для бесконечной среды в конце кампании:

$$k_{\infty} = \varepsilon_{\kappa.\kappa.} \cdot \varphi_{\kappa.\kappa.} \cdot \theta_{\kappa.\kappa.} \cdot \eta_{\kappa.\kappa.} = 1,024 \cdot 0,900 \cdot 0,874 \cdot 1,943 = 1,565.$$

Эффективный коэффициент размножения в конце кампании:

$$L_{\phi.\delta.} = \sqrt{\frac{1}{3 \cdot \Sigma_{a_{\phi.\delta.}} \cdot \Sigma_{tr_{\phi.\delta.}}}} = 0,980 \text{ см};$$

$$L_p^2 = L_{зам}^2 \cdot (1 - \theta) + L_{\phi}^2 \cdot \theta = 2,042 \text{ см}^2.$$

По формуле (2.26) определим значение эффективного коэффициента размножения в конце кампании:

$$k_{\phi} = \frac{1,565 \cdot \exp(-1,144 \cdot 10^{-3} \cdot 101,260)}{1 + 1,144 \cdot 10^{-3} \cdot 2,042} = 1,391.$$

## 4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

### 4.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

#### 4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Для того чтобы узнать в каком направлении проводить исследования, был произведен анализ потребителей. В качестве потребителей были выбраны основные страны, использующие ядерную энергетику. Вторым критерием был выбран тип теплоносителя, использующийся в ядерной установке. На рисунке 4.1 представлена карта сегментирования рынка ядерных паропроизводящих установок.

|                                          |              | Тип теплоносителя |         |        |     |
|------------------------------------------|--------------|-------------------|---------|--------|-----|
|                                          |              | Легкая            | Тяжелая | Жидкий | Газ |
| Основные страны,<br>использующие ядерную | Россия       |                   |         |        |     |
|                                          | США          |                   |         |        |     |
|                                          | Канада       |                   |         |        |     |
|                                          | Франция      |                   |         |        |     |
|                                          | Великобритан |                   |         |        |     |
|                                          | Германия     |                   |         |        |     |
|                                          | Индия        |                   |         |        |     |
|                                          | Китай        |                   |         |        |     |

Рисунок 4.1 – Карта сегментирования рынка ЯППУ

По итогам составления карты сегментирования рынка ЯППУ видно, что ЯППУ с легкой водой в качестве теплоносителя получили огромное распространение в мире. Далее идут тяжелая вода и жидкий металл. ЯППУ с газовым теплоносителем распространены только в Великобритании. Это связано с тем, что именно там проводились исследования в этой области. Наиболее привлекательны ЯППУ с легкой водой в качестве теплоносителя, так как легкая

вода имеет ряд преимуществ по сравнению с остальными типами теплоносителей. Самое главное преимущество – это ее дешевизна. Этим и объясняется то, почему ЯППУ с ней так распространены.

#### 4.1.2 Анализ конкурентных технических решений

Для проведения анализа конкурентоспособности разработки будет использоваться оценочная карта, приведенная в таблице 4.1. В качестве конкурирующих разработок были приняты: К1 – РИТМ-200, К2 – КЛТ-40С. Позиция разработки и конкурентов оценивается по каждому показателю экспертным путем по пятибалльной шкале, где 1 – наиболее слабая позиция, а 5 – наиболее сильная. Веса показателей, определяемые экспертным путем, в сумме должны составлять единицу.

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum B_i \cdot B_i,$$

где  $K$  – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

$B_i$  – вес показателя (в долях единицы);

$B_i$  – балл  $i$ -го показателя.

В обоих ЯППУ в качестве теплоносителя используется легкая вода, в качестве топлива обогащенный уран.

Из данного анализа видно, что разрабатываемая ЯППУ не имеет особых преимуществ перед конкурентами, но она более сбалансирована. Основным её недостатком являются то, что установки такого же типа не распространены на рынке, но это связано не с техническими особенностями установки, а с тем, что на установке такого же типа произошла огромная по масштабам авария.

Таблица 4.1 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

| Критерии оценки                                         | Вес критерия | Баллы          |                 |                 | Конкурентоспособность |                 |                 |
|---------------------------------------------------------|--------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------------|-----------------|-----------------|
|                                                         |              | Б <sub>ф</sub> | Б <sub>к1</sub> | Б <sub>к2</sub> | К <sub>ф</sub>        | К <sub>к1</sub> | К <sub>к2</sub> |
| 1                                                       | 2            | 3              | 4               | 5               | 6                     | 7               | 8               |
| <b>Технические критерии оценки ресурсоэффективности</b> |              |                |                 |                 |                       |                 |                 |
| 1. Повышение производительности труда                   | 0,02         | 5              | 4               | 4               | 0,10                  | 0,08            | 0,08            |
| 2. Удобство в эксплуатации                              | 0,02         | 3              | 3               | 4               | 0,06                  | 0,06            | 0,08            |
| 3. Энергоэкономичность                                  | 0,04         | 3              | 4               | 4               | 0,12                  | 0,16            | 0,16            |
| 4. Надежность                                           | 0,05         | 3              | 4               | 5               | 0,15                  | 0,20            | 0,25            |
| 5. Уровень воздействия на ближайшие населённые пункты   | 0,01         | 4              | 4               | 4               | 0,04                  | 0,04            | 0,04            |
| 6. Безопасность                                         | 0,30         | 4              | 4               | 4               | 1,20                  | 1,20            | 1,20            |
| 7. Потребность в материальных ресурсах                  | 0,05         | 4              | 4               | 4               | 0,20                  | 0,20            | 0,20            |
| 8. Обогащение топлива                                   | 0,10         | 5              | 5               | 4               | 0,50                  | 0,50            | 0,40            |
| 9. Расход воды                                          | 0,05         | 4              | 4               | 3               | 0,20                  | 0,20            | 0,15            |
| <b>Экономические критерии оценки эффективности</b>      |              |                |                 |                 |                       |                 |                 |
| 1. Конкурентоспособность энергетической установки       | 0,01         | 3              | 4               | 5               | 0,03                  | 0,04            | 0,05            |
| 2. Уровень проникновения на рынок                       | 0,05         | 1              | 3               | 5               | 0,05                  | 0,15            | 0,25            |
| 3. Предполагаемый срок эксплуатации                     | 0,2          | 4              | 4               | 3               | 0,80                  | 0,80            | 0,60            |
| 4. Послепродажное обслуживание                          | 0,1          | 2              | 3               | 4               | 0,20                  | 0,30            | 0,40            |
| Итого:                                                  | <b>1</b>     | <b>51</b>      | <b>53</b>       | <b>55</b>       | <b>3,65</b>           | <b>3,93</b>     | <b>3,86</b>     |

Выше представлен анализ конкурентоспособности ЯЭУ, представленной в данной работе, среди отечественных разработок РИТМ-200 (Б<sub>к1</sub>) и КЛТ-40С (Б<sub>к2</sub>). Из данного анализа видно, что разрабатываемая ЯППУ не имеет особых преимуществ перед конкурентами, но она более сбалансирована и не уступает обоим ЯППУ. Основным недостатком ее являются то, что установки такого же

типа не распространены на рынке из-за особенности применения установок подобного рода.

## 4.2 SWOT-анализ

SWOT-анализ – (strengths, weaknesses, opportunities, threats – сильные стороны, слабые стороны, возможности, угрозы) – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта, который применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта.

Сильные стороны – это факторы, характеризующие конкурентоспособную сторону научно-исследовательского проекта. Сильные стороны свидетельствуют о том, что у проекта есть отличительное преимущество или особые ресурсы, являющиеся особенными с точки зрения конкуренции. Другими словами, сильные стороны – это ресурсы или возможности, которыми располагает руководство проекта и которые могут быть эффективно использованы для достижения поставленных целей.

Сильными сторонами данной ЯЭУ можно назвать следующие свойства и особенности установки:

- использование корпусной схемы увеличивает безопасность установки; возможность перегрузки топлива в реакторе, не останавливая его;
- возможность применения одноконтурной схемы с подачей пара теплоносителя первого контура в силовую установку;
- малые габариты установки.

Слабые стороны – это недостаток, упущение или ограниченность научно-исследовательского проекта, которые препятствуют достижению его целей. Это то, что плохо получается в рамках проекта или где он располагает недостаточными возможностями или ресурсами по сравнению с конкурентами.

Слабыми сторонами разрабатываемой ЯЭУ можно назвать следующие свойства и особенности:

- слабое внедрение на рынок;

- высокое давление при энергетически приемлемых температурах;
- коррозионная активность и сильное взаимодействие с металлическим топливом, что заставляет применять двуокись урана и нержавеющие конструкционные материалы.

Возможности включают в себя любую предпочтительную ситуацию в настоящем или будущем, возникающую в условиях окружающей среды проекта, например, тенденцию, изменение или предполагаемую потребность, которая поддерживает спрос на результаты проекта и позволяет руководству проекта улучшить свою конкурентную позицию.

К возможностям данной ЯЭУ можно отнести:

- снижение стоимости электроэнергии;
- предоставление дополнительных рабочих мест;
- расширение производства и мощностей для обеспечения работоспособности ЯЭУ.

Угроза представляет собой любую нежелательную ситуацию, тенденцию или изменение в условиях окружающей среды проекта, которые имеют разрушительный или угрожающий характер для его конкурентоспособности в настоящем или будущем. В качестве угрозы может выступать барьер, ограничение или что-либо еще, что может повлечь за собой проблемы, разрушения, вред или ущерб, наносимый проекту.

К угрозам можно отнести:

- природные катаклизмы: землетрясения, цунами, смерчи;
- снижение государственного финансирования развития атомной энергетики и ввода в эксплуатацию новых типов установок;
- угроза диверсионных и террористических действий в отношении ЯЭУ.

В таблице 4.2 представлена интерактивная матрица проекта, в которой показано соотношение сильных сторон с возможностями, что позволяет более подробно рассмотреть перспективность разработки.

Таблица 4.2 – Интерактивная матрица проекта

| Сильные стороны проекта |    |    |    |    |
|-------------------------|----|----|----|----|
| Возможности проекта     |    | C1 | C2 | C3 |
|                         | B1 | –  | +  | +  |
|                         | B2 | –  | –  | –  |
|                         | B3 | –  | –  | –  |

В матрице пересечения сильных сторон и возможностей имеет определенный результат: «плюс» – сильное соответствие сильной стороны и возможности, «минус» – слабое соотношение.

В таблице 4.3 представлен SWOT-анализ виде таблицы, так же показаны результаты пересечений сторон, возможностей и угроз.

Таблица 4.3 – SWOT-анализ

|                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                                                                                                                                                                       | <b>Сильные стороны научно-исследовательского проекта:</b><br>С1. Использование корпусной схемы увеличивает безопасность установки;<br>С2. Возможность применения одноконтурной схемы с подачей пара теплоносителя первого контура в силовую установку;<br>С3. Малые габариты установки. | <b>Слабые стороны научно-исследовательского проекта:</b><br>Сл1. Слабое внедрение на рынок.<br>Сл2. Высокое давление при энергетически приемлемых температурах;<br>Сл3. Коррозионная активность и сильное взаимодействие с металлическим топливом, что заставляет применять двуокись урана и нержавеющие конструкционные материалы. |
| <b>Возможности:</b><br>В1. Использование установок в труднодоступных регионах, а также на транспортных установках;<br>В2. Достаточное предложение специалистов на рынке труда;<br>В3. Разъяснительные работы со стороны государства о безопасности АЭ | 1. Возможность использования одноконтурной схемы и малые габариты, позволяют применять установку в труднодоступных регионах.<br>2. Малые габариты позволяют обеспечить транспортабельность установки.                                                                                   | 1. Возможность использования установок в труднодоступных регионах удешевит затраты на электроэнергию, возможность обеспечить кадрами.                                                                                                                                                                                               |

### Продолжение таблицы 4.3

|                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                         |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p><b>Угрозы:</b><br/> У1. Природные катаклизмы.<br/> У2. Снижение государственного финансирования развития атомной энергетики и ввода в эксплуатацию новых типов установок.<br/> У3. Наличие угрозы несанкционированных действий в отношении ЯЭУ.</p> | <p>1. Преимущества ЯППУ ведут за собой привлечение действий террористического и диверсионного характеров.<br/> 2. Преимущества реактора перед конкурентами вызывает дополнительный интерес у государства.</p> | <p>1. Наличие высокого давления делает ЯППУ уязвимой перед природными катаклизмами.<br/> 2. Возникновение аварии поставит снизит интерес к проектам подобного рода.</p> |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

Проанализировав характер НТР можно сделать вывод, что наиболее оптимальной стратегией выхода разработки на рынок является стратегия совместной предпринимательской деятельности. Совместная предпринимательская деятельность – это стратегия, которая основана на соединении общих усилий фирмы с коммерческими предприятиями страны-партнера для создания производственных и маркетинговых мощностей. Данная стратегия выбрана ввиду того, что предприятие, заинтересованное в ЯЭУ на российском рынке, одно (Росэнергоатом). В свою очередь, данное предприятие требует тесного взаимодействия с другими производственными компаниями.

## 4.3 Планирование научно-исследовательских работ

### 4.3.1 Структура работ в рамках научного исследования

Планирование комплекса предполагаемых работ осуществляется в следующем порядке:

- определение структуры работ в рамках научного исследования;
- определение участников каждой работы;
- установление продолжительности работ;
- построение графика проведения научных исследований.

Для выполнения научных исследований формируется рабочая группа, в состав которой могут входить научные сотрудники и преподаватели, инженеры,

техники и лаборанты, численность групп может варьироваться. По каждому виду запланированных работ устанавливается соответствующая должность исполнителей. Примерный порядок составления этапов и работ, распределение исполнителей по данным видам работ приведен в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

| Основные этапы                                           | Содержание работ                                                                                       | Должность исполнителя |
|----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| Разработка технического задания                          | Составление и утверждение технического задания                                                         | Руководитель темы     |
| Выбор направления исследований                           | Подбор и изучение материалов по теме                                                                   | Студент               |
|                                                          | Выбор направления исследований                                                                         | Руководитель, студент |
|                                                          | Календарное планирование работ по теме                                                                 | Руководитель          |
| Теоретические и экспериментальные исследования           | Проведение теоретических расчетов и обоснований                                                        | Студент               |
|                                                          | Разработка чертежей                                                                                    | Студент               |
|                                                          | Оценивание правильности полученных характеристик сравнивая их с характеристиками существующего аналога | Руководитель, студент |
| Обобщение и оценка результатов                           | Определение целесообразности проведения ОКР                                                            | Руководитель          |
| <b>Проведение ОКР</b>                                    |                                                                                                        |                       |
| Разработка технической документации и проектирование     | . Разработка принципиальной схемы                                                                      | Студент               |
|                                                          | Выбор и расчет конструкции                                                                             | Студент               |
|                                                          | Разработка чертежей основных узлов конструкции                                                         | Студент               |
|                                                          | Оценка эффективности производства и применения проектируемого изделия                                  | Студент               |
| Оформление отчета по НИР (комплекта документации по ОКР) | Составление пояснительной записки (эксплуатационно-технической документации)                           | Студент               |
|                                                          | Проверка правильности выполнения ГОСТа пояснительной записки                                           | Руководитель, студент |
|                                                          | Представление разработки заинтересованной компании                                                     | Руководитель, студент |

### 4.3.2 Определение трудоемкости выполнения работ

Трудовые затраты в большинстве случаев образуют основную часть стоимости разработки, поэтому важным моментом является определение трудоемкости работ каждого из участников научного исследования.

Трудоемкость выполнения научного исследования оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит от множества трудно учитываемых факторов. Для определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости  $t_{ож_i}$  используется следующая формула:

$$t_{ож_i} = \frac{3 \cdot t_{min_i} + 2 \cdot t_{max_i}}{5}$$

где  $t_{ож_i}$  – ожидаемая трудоемкость выполнения  $i$ -ой работы чел.-дн.;

$t_{min_i}$  – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной  $i$ -ой работы (оптимистическая оценка: в предположении наиболее благоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.;

$t_{max_i}$  – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной  $i$ -ой работы (пессимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.

Исходя из ожидаемой трудоемкости работ, определяется продолжительность каждой работы в рабочих днях  $T_p$ , учитывающая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями. Такое вычисление необходимо для обоснованного расчета заработной платы, так как удельный вес зарплаты в общей сметной стоимости научных исследований составляет около 65 %.

$$T_{p_i} = \frac{t_{ож_i}}{Q_i},$$

где  $T_{p_i}$  – продолжительность одной работы, раб. дн.;

$t_{ож_i}$  – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел.-дн.;

$Ч_i$  – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел..

### 4.3.3 Разработка графика проведения научного исследования

Диаграмма Ганта – горизонтальный ленточный график, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ.

Для удобства построения графика, длительность каждого из этапов работ из рабочих дней следует перевести в календарные дни. Для этого необходимо воспользоваться следующей формулой:

$$T_{\kappa_i} = T_{p_i} \cdot k_{\text{кал}},$$

где  $T_{\kappa_i}$  – продолжительность выполнения  $i$ -й работы в календарных днях;

$T_{p_i}$  – продолжительность выполнения  $i$ -й работы в рабочих днях;

$k_{\text{кал}}$  – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}},$$

где  $T_{\text{кал}}$  – количество календарных дней в году;

$T_{\text{вых}}$  – количество выходных дней в году;

$T_{\text{пр}}$  – количество праздничных дней в году.

Рассчитанные значения в календарных днях по каждой работе  $T_{\kappa_i}$  необходимо округлить до целого числа.

$$k_{\text{кал}} = \frac{365}{365 - 96 - 20} = 1,47,$$

$$t_{\min_1} = 1; t_{\max_1} = 3;$$

$$t_{\text{о.ж.}_i} = \frac{3 \cdot 1 + 2 \cdot 3}{5} = 1,80; T_{p_i} = \frac{1,80}{1} = 1,80; T_{\kappa_1} = 1,80 \cdot 1,47 = 2,65.$$

Все значения, полученные при расчетах по вышеприведенным формулам, были сведены в таблицу 4.5.

Таблица 4.5 – Временные показатели проведения научного исследования

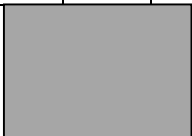
|                                                                                                           | Трудоемкость работ     |   |                        |   |                       |      | Длительность в раб. днях, $T_{p_i}$ |      | Длительность работ в календарных днях, $T_{\kappa_i}$ |   |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|---|------------------------|---|-----------------------|------|-------------------------------------|------|-------------------------------------------------------|---|
|                                                                                                           | $t_{min_i}$ , чел.-дни |   | $t_{max_i}$ , чел.-дни |   | $t_{ож_i}$ , чел.-дни |      |                                     |      |                                                       |   |
| Название работы                                                                                           | С                      | Р | С                      | Р | С                     | Р    | С                                   | Р    | С                                                     | Р |
| 1. Составление и утверждение технического задания                                                         | -                      | 1 | -                      | 3 | -                     | 1,80 | -                                   | 1,80 | -                                                     | 3 |
| 2. Подбор и изучение материалов по теме                                                                   | 5                      | - | 7                      | - | 5,80                  | -    | 5,80                                | -    | 5                                                     | - |
| 3. Выбор направления исследований                                                                         | 1                      | 1 | 2                      | 2 | 1,40                  | 1,40 | 0,70                                | 0,70 | 1                                                     | 1 |
| 4. Календарное планирование работ по теме                                                                 | -                      | 1 | -                      | 6 | -                     | 2,60 | -                                   | 2,60 | -                                                     | 5 |
| 5. Проведение теоретических расчетов и обоснований                                                        | 12                     | - | 30                     | - | 19,20                 | -    | 19,20                               | -    | 15                                                    | - |
| 6. Разработка чертежей                                                                                    | 1                      | - | 3                      | - | 1,80                  | -    | 1,80                                | -    | 3                                                     | - |
| 7. Оценивание правильности полученных характеристик сравнивая их с характеристиками существующего аналога | 2                      | 1 | 5                      | 2 | 3,20                  | 1,40 | 1,60                                | 0,70 | 3                                                     | 1 |
| 8. Определение целесообразности проведения ОКР                                                            | -                      | 1 | -                      | 2 | -                     | 1,40 | -                                   | 1,40 | -                                                     | 3 |
| 9. Разработка принципиальной схемы                                                                        | 2                      | - | 7                      | - | 4                     | -    | 4                                   | -    | 3                                                     | - |
| 10. Выбор и расчет конструкции                                                                            | 11                     | - | 24                     | - | 16                    | -    | 16                                  | -    | 5                                                     | - |
| 11. Разработка чертежей основных узлов конструкции                                                        | 2                      | - | 3                      | - | 2,40                  | -    | 2,40                                | -    | 5                                                     | - |
| 12. Оценка эффективности производства и применения проектируемого изделия                                 | 1                      | - | 3                      | - | 1,80                  | -    | 1,80                                | -    | 3                                                     | - |

Продолжение таблицы 4.5

|                                                                                  |   |   |   |   |      |   |      |      |   |   |
|----------------------------------------------------------------------------------|---|---|---|---|------|---|------|------|---|---|
| 13. Составление пояснительной записки (эксплуатационно-технической документации) | 4 | - | 5 | - | 3,80 | - | 4,40 | -    | 7 | - |
| 14. Проверка правильности выполнения ГОСТа пояснительной записки                 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1,40 | 1 | 0,70 | 0,50 | 1 | 1 |
| 15. Представление разработки заинтересованной компании                           | 1 | 1 | 1 | 1 | 1    | 1 | 0,33 | 0,33 | 1 | 1 |

На основе таблицы 4.5 строится календарный план-график. График строится для максимального по длительности исполнения работ в рамках научно-исследовательского проекта и представлен в таблице 4.6 с разбивкой по месяцам и неделям за период времени дипломирования.

Таблица 4.6 – Календарный план-график проведения НИОКР по теме

| Вид работ                                          | Исполнители | $T_{к_i}$ , кал. дни | Продолжительность выполнения работ                                                                                                                                         |                                                                                      |   |   |      |   |   |   |
|----------------------------------------------------|-------------|----------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---|---|------|---|---|---|
|                                                    |             |                      | Май                                                                                                                                                                        |                                                                                      |   |   | Июнь |   |   |   |
|                                                    |             |                      | 1                                                                                                                                                                          | 2                                                                                    | 3 | 4 | 1    | 2 | 3 | 4 |
| 1. Составление и утверждение технического задания  | Р           | 3                    |                                                                                         |                                                                                      |   |   |      |   |   |   |
| 2. Подбор и изучение материалов по теме            | С           | 5                    |                                                                                         |                                                                                      |   |   |      |   |   |   |
| 3. Выбор направления исследований                  | С, Р        | 1, 1                 | <br> |                                                                                      |   |   |      |   |   |   |
| 4. Календарное планирование работ по теме          | Р           | 5                    |                                                                                         |                                                                                      |   |   |      |   |   |   |
| 5. Проведение теоретических расчетов и обоснований | С           | 15                   |                                                                                                                                                                            |  |   |   |      |   |   |   |

Продолжение таблицы 4.6

|                                                                                                           |      |         |  |  |  |  |  |  |  |  |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|---------|--|--|--|--|--|--|--|--|
| 6. Разработка чертежей                                                                                    | С    | 3       |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 7. Оценивание правильности полученных характеристик сравнивая их с характеристиками существующего аналога | С, Р | 3, 1    |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 8. Определение целесообразности проведения ОКР                                                            | Р    | 3       |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 9. Разработка принципиальной схемы                                                                        | С    | 3       |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 10. Выбор и расчет конструкции                                                                            | С    | 6       |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 11. Разработка чертежей основных узлов конструкции                                                        | С    | 5       |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 12. Оценка эффективности производства и применения проектируемого изделия                                 | С    | 3       |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 13. Составление пояснительной записки (эксплуатационно-технической документации)                          | С    | 7       |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 14. Проверка правильности выполнения ГОСТа пояснительной записки                                          | С, Р | 1, 1    |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 15. Представление разработки заинтересованной компании                                                    | С, Р | 1, 1, 1 |  |  |  |  |  |  |  |  |



– студент;



– руководитель

#### 4.3.4 Бюджет научно-технического исследования

При планировании бюджета НТИ должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов расходов, связанных с его выполнением. В процессе формирования бюджета НТИ используется следующая группировка затрат по статьям:

- материальные затраты НТИ;
- затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ;
- основная заработная плата исполнителей темы;
- дополнительная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- затраты научные и производственные командировки;
- контрагентные расходы;
- накладные расходы.

##### 4.3.4.1 Расчет материальных затрат научно-технического исследования

Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле:

$$З_m = (1 + k_{mз}) \cdot \sum_{i=1}^m Ц_i \cdot N_{расх_i},$$

где  $m$  – количество видов материальных ресурсов, потребляемых при выполнении научного исследования;

$N_{расх_i}$  – количество материальных ресурсов  $i$ -го вида, планируемых к использованию при выполнении научного исследования (шт., кг, м, м<sup>2</sup> и т.д.);

$Ц_i$  – цена приобретения единицы  $i$ -го вида потребляемых материальных ресурсов (руб./шт., руб./кг, руб./м, руб./м<sup>2</sup> и т.д.);

$k_{mз}$  – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы.

Значения цен на материальные ресурсы могут быть установлены по данным, размещенным на соответствующих сайтах в интернете предприятиями-изготовителями (либо организациями-поставщиками).

Материальные затраты, необходимые для данной разработки, заносятся в таблицу 3.8.

Отсутствие в таблице разделения на источники финансирования говорит о том, что источник один. Источник финансов в данной работе – студент.

Основные работы для ВКР проводились за рабочей станцией в комнате жилого дома. Время, проведенное за рабочей станцией: 960 часов. Мощность рабочей станции: 0,50 кВт.

Затраты на электроэнергию рассчитываются по формуле

$$C = C_{эл} \cdot P \cdot F_{об} = 2,7 \cdot 0,9 \cdot 900 = 2187$$

где  $C_{эл}$  – тариф на промышленную электроэнергию (2,7 руб. за 1 кВт·ч);  
 $P$  – мощность оборудования, кВт;  
 $F_{об}$  – время использования оборудования, ч.

Затраты на электроэнергию составили 2187 рубля.

Данный пункт рассчитывает затраты на приобретения оборудования, используемого в проведении работы. Специальное оборудование, используемое для работы, входит в виде амортизационных отчислений за период использования.

Расчет амортизационных отчислений ведется по формуле:

$$A = \frac{H_a \cdot C \cdot T_0}{365 \cdot 100\%} = \frac{33 \cdot 45000 \cdot 120}{365 \cdot 100\%} = 4882,$$

где  $A$  – амортизационные отчисления, руб.;  
 $C$  – стоимость оборудования, руб.;  
 $H_a$  – годовая норма амортизации 33%;  
 $T_0$  – время использования оборудования.

Расчет отчислений по единицам оборудования приведен в таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Амортизационные отчисления по единицам используемого оборудования.

| Наименование оборудования | Количество | $C$ , руб | $H_a$ , % | $T_0$ , дни | $A$ , руб |
|---------------------------|------------|-----------|-----------|-------------|-----------|
| Рабочая станция           | 1          | 45000     | 33        | 120         | 4882      |
| Итого, руб.:              | 4882       |           |           |             |           |

Таблица 4.8 – Материальные затраты

| Наименование               | Единица измерения | Количество | Цена за ед., руб. | Затраты на материалы, (З <sub>м</sub> ), руб. |
|----------------------------|-------------------|------------|-------------------|-----------------------------------------------|
| Электроэнергия             | кВт·ч             | 480        | 2,7               | 2187                                          |
| Бумага                     | шт.               | 200        | 1,5               | 76                                            |
| Печать на листе формата А4 | шт.               | 200        | 1,50              | 300                                           |
| Карандаш                   | шт.               | 4          | 7                 | 28                                            |
| Ластик                     | шт.               | 2          | 10                | 20                                            |
| Доступ в интернет          | месяц             | 4          | 350               | 1400                                          |
| Учебная литература         | шт.               | 1          | 350               | 350                                           |
| Итого, руб.:               | 4361              |            |                   |                                               |

#### 4.3.4.2 Основная заработная плата исполнителей темы

В настоящую статью включается основная заработная плата научных и инженерно-технических работников, рабочих макетных мастерских и опытных производств, непосредственно участвующих в выполнении работ по данной теме. Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы окладов и тарифных ставок. В состав основной заработной платы включается премия, выплачиваемая

ежемесячно из фонда заработной платы в размере 20 – 30 % от тарифа или оклада. Расчет основной заработной платы сводится в таблицу 4.9.

Таблица 4.9 – Расчет основной заработной платы

| Наименование этапов                                                                                    | Трудоемкость, чел.-дни |      | Заработная плата, приходящаяся на один чел.-день, тыс. руб. |       | Всего заработная плата по тарифу (окладам), тыс. руб. |        |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|------|-------------------------------------------------------------|-------|-------------------------------------------------------|--------|
|                                                                                                        | С                      | Р    | С                                                           | Р     | С                                                     | Р      |
| Составление и утверждение технического задания                                                         | -                      | 1,80 | 0,140                                                       | 1,500 | -                                                     | 2,700  |
| Подбор и изучение материалов по теме                                                                   | 5,20                   | -    |                                                             |       | 0,728                                                 | -      |
| Выбор направления исследований                                                                         | 1,80                   | 1,80 |                                                             |       | 0,252                                                 | 2,700  |
| Календарное планирование работ по теме                                                                 | -                      | 3,40 |                                                             |       | -                                                     | 5,100  |
| Проведение теоретических расчетов и обоснований                                                        | 20,80                  | -    |                                                             |       | 2,912                                                 | -      |
| Разработка чертежей                                                                                    | 1,80                   | -    |                                                             |       | 0,252                                                 | -      |
| Оценивание правильности полученных характеристик сравнивая их с характеристиками существующего аналога | 3,20                   | 1,40 |                                                             |       | 0,448                                                 | 2,100  |
| Определение целесообразности проведения ОКР                                                            | -                      | 1,80 | 0,140                                                       | 1,500 | -                                                     | 2,700  |
| Разработка принципиальной схемы                                                                        | 4                      | -    |                                                             |       | 0,560                                                 | -      |
| Выбор и расчет конструкции                                                                             | 11                     | -    |                                                             |       | 1,54                                                  | -      |
| Разработка чертежей основных узлов конструкции                                                         | 2,80                   | -    |                                                             |       | 0,392                                                 | -      |
| Оценка эффективности производства и применения проектируемого изделия                                  | 2,20                   | -    |                                                             |       | 0,308                                                 | -      |
| Составление пояснительной записки (эксплуатационно-технической документации)                           | 3,80                   | -    |                                                             |       | 0,532                                                 | -      |
| Проверка правильности выполнения ГОСТа пояснительной записки                                           | 1,80                   | 1,40 |                                                             |       | 0,252                                                 | 2,100  |
| Представление разработки заинтересованной компании                                                     | 1                      | 1    |                                                             |       | 0,140                                                 | 1,500  |
| Итого, руб.:                                                                                           |                        |      |                                                             |       | 8,316                                                 | 18,900 |

Статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением НТИ, (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату:

$$Z_{\text{зн}} = Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}},$$

где  $Z_{\text{осн}}$  – основная заработная плата;

$Z_{\text{доп}}$  – дополнительная заработная плата (12 – 20% от  $Z_{\text{осн}}$ ).

Основная заработная плата ( $Z_{\text{осн}}$ ) руководителя (лаборанта, студента) от предприятия (при наличии руководителя от предприятия) рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_p,$$

где  $T_p$  – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дней (таблица 3.6);

$Z_{\text{дн}}$  – среднедневная заработная плата работника, руб..

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_m \cdot M}{F_{\text{д}}},$$

где  $Z_m$  – месячный должностной оклад работника, руб.;

$M$  – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

– при отпуске в 24 раб. дня  $M = 11,2$  месяца, 5-дневная неделя;

– при отпуске в 48 раб. дней  $M = 10,4$  месяца, 6-дневная неделя.

$F_{\text{д}}$  – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дни (таблица 4.10).

Таблица 4.10 – Баланс рабочего времени

| Показатели рабочего времени                                         | Руководитель | Студент |
|---------------------------------------------------------------------|--------------|---------|
| Календарное число дней                                              | 365          | 365     |
| Количество нерабочих дней:<br>– выходные дни;<br>– праздничные дни. | 116          | 116     |
| Потери рабочего времени:<br>– отпуск;<br>– невыходы по болезни.     | 50           | 45      |
| Действительный годовой фонд рабочего времени                        | 199          | 204     |

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_m = Z_{mc} \cdot (1 + k_{np} + k_o) \cdot k_p,$$

где  $Z_{mc}$  – заработная плата по тарифной ставке, руб.;

$k_p$  – районный коэффициент, равный 1,30 (для города Томска).

Тарифная заработная плата  $Z_{mc}$  находится из произведения тарифной ставки работника 1-го разряда  $T_{c_1} = 600$  руб. на тарифный коэффициент  $k_m$  и учитывается по единой для бюджетных организации тарифной сетке. Для предприятий, не относящихся к бюджетной сфере, тарифная заработная плата (оклад) рассчитывается по тарифной сетке, принятой на данном предприятии. Расчёт основной заработной платы приведён в таблице 4.11.

Таблица 4.11 – Расчёт основной заработной платы

| Исполнители  | $Z_{mc}$ , руб. | $k_p$ | $Z_m$ , руб. | $Z_{дн}$ , руб. | $T_p$ , раб. дн. | $Z_{осн}$ , руб. |
|--------------|-----------------|-------|--------------|-----------------|------------------|------------------|
| Руководитель | 23130           | 1,30  | 45103        | 2357            | 15               | 35357            |
| Студент      | 2800            | -     | 2800         | 142             | 53               | 7565             |
| Итого, руб.: | 42922           |       |              |                 |                  |                  |

#### 4.3.4.3 Отчисления во внебюджетные фонды (страхование)

В данной статье расходов отражаются обязательные отчисления по установленным законодательством Российской Федерации нормам органам государственного социального страхования (ФСС), пенсионного фонда (ПФ) и медицинского страхования (ФФОМС) от затрат на оплату труда работников. Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$З_{внеб} = k_{внеб} \cdot (З_{осн} + З_{доп}),$$

где  $k_{внеб}$  – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.).

В соответствии с Федеральным закона от 24.07.2009 №212-ФЗ установлен размер страховых взносов равный 30%. На основании пункта 1 ст.58 закона №212-ФЗ для учреждений осуществляющих образовательную и научную деятельность водится пониженная ставка – 27,10%.

Отчисления во внебюджетные фонды рекомендуется представлять в таблице 4.12.

Таблице 4.12 – Отчисления во внебюджетные фонды

| Исполнитель                                     | Руководитель |
|-------------------------------------------------|--------------|
| Основная заработная плата, руб.                 | 42922        |
| Дополнительная заработная плата, руб.           | 5150         |
| Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды, % | 27,10        |
| Сумма отчислений                                | 13027        |
| Итого, руб.:                                    | 13027        |

#### 4.3.4.4 Накладные расходы

В данную статью входят расходы на содержание аппарата управления и общехозяйственных служб. По этой статье учитываются оплата труда административно-управленческого персонала, содержание зданий, оргтехники и хозяйинвентаря, амортизация имущества, расходы по охране труда и подготовке кадров.

Накладные расходы в ТПУ составляют 25 – 35% от суммы основной и дополнительной зарплаты работников, участвующих в выполнении темы. Расчет накладных расходов ведется по следующей формуле:

$$C_{\text{накл}} = k_{\text{накл}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}),$$

где  $k_{\text{накл}}$  – коэффициент накладных расходов, равный 30%.

Накладные расходы составят:

$$C_{\text{накл}} = 0,30 \cdot (42922 + 5150) = 14421 \text{ руб.}$$

#### 4.3.4.5 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы (темы) является основой для формирования бюджета затрат проекта, который при формировании договора с заказчиком защищается научной организацией в качестве нижнего предела затрат на разработку научно-технической продукции.

Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект по каждому варианту исполнения приведен в таблице 4.13.

Таблица 4.13 – Расчет бюджета затрат НТИ

| Наименование статьи                                          | Сумма, руб. |
|--------------------------------------------------------------|-------------|
| Материальные затраты НТИ                                     | 9243        |
| Затраты по основной заработной плате исполнителей темы       | 42922       |
| Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы | 5150        |
| Отчисления во внебюджетные фонды                             | 13027       |
| Накладные расходы                                            | 14421       |
| Бюджет затрат НТИ                                            | 86449       |

#### 4.4 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования

Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования. Его нахождение связано с определением двух средневзвешенных величин: финансовой эффективности и ресурсоэффективности.

Интегральный показатель финансовой эффективности научного исследования получают в ходе оценки бюджета затрат трех (или более) вариантов исполнения научного исследования. Для этого наибольший интегральный показатель реализации технической задачи принимается за базу расчета (как знаменатель), с которым соотносятся финансовые значения по всем вариантам исполнения.

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{фин}^{исп_i} = \frac{\Phi_{p_i}}{\Phi_{max}},$$

где  $I_{фин}^{исп_i}$  – интегральный финансовый показатель разработки;

$\Phi_{p_i}$  – стоимость  $i$ -го варианта исполнения;

$\Phi_{max}$  – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта (в т.ч. аналоги).

Полученная величина интегрального финансового показателя разработки отражает соответствующее численное увеличение бюджета затрат разработки в размах (значение больше единицы), либо соответствующее численное удешевление стоимости разработки в размах (значение меньше единицы, но больше нуля).

Так как разработка имеет одно исполнение, то

$$I_{\text{фин}}^{\text{исп}_i} = \frac{83449}{83449} = 1.$$

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения объекта исследования можно определить следующим образом:

$$I_{p_i} = \sum a_i \cdot b_i,$$

где  $I_{p_i}$  – интегральный показатель ресурсоэффективности для  $i$ -го варианта исполнения разработки;

$a_i$  – весовой коэффициент  $i$ -го варианта исполнения разработки;

$b_i$  – балльная оценка  $i$ -го варианта исполнения разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности представлен в форме таблицы (таблица 4.14).

Таблица 4.14 – Оценка характеристик исполнения проекта

|                                                          | Весовой коэффициент параметра | Оценка |
|----------------------------------------------------------|-------------------------------|--------|
| Способствует росту производительности труда пользователя | 0,20                          | 5      |
| Удобство в эксплуатации                                  | 0,15                          | 4      |
| Помехоустойчивость                                       | 0,15                          | 3      |
| Энергосбережение                                         | 0,20                          | 4      |
| Надежность                                               | 0,25                          | 4      |
| Материалоемкость                                         | 0,05                          | 3      |
| Итого:                                                   | 1                             |        |

$$I_{p_{исн1}} = 5 \cdot 0,20 + 3 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,20 + 4 \cdot 0,25 + 3 \cdot 0,05 = 4.$$

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{исн1} = \frac{I_{p_{исн1}}}{I_{фин1}}, I_{исн2} = \frac{I_{p_{исн2}}}{I_{фин2}} \text{ и т.д.}$$

Сравнительная эффективность проекта ( $\mathcal{E}_{cp}$ ):

$$\mathcal{E}_{cp} = \frac{I_{исн1}}{I_{исн2}}$$

Таблица 4.15 – Эффективность разработки

| Показатели                                              | Оценка |
|---------------------------------------------------------|--------|
| Интегральный финансовый показатель разработки           | 1      |
| Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки | 4      |
| Интегральный показатель эффективности                   | 0,25   |

Сравнение значений интегральных показателей эффективности позволяет понять и выбрать более эффективный вариант решения поставленной технической задачи с позиции финансовой и ресурсной эффективности. Но т.к. задача имеет довольно строгие условия, решение имеет лишь один вариант.

## **5 Социальная ответственность**

В современных условиях одним из основных направлений коренного улучшения всей профилактической работы по снижению производственного травматизма и профессиональной заболеваемости является повсеместное внедрение комплексной системы управления охраной труда, то есть путем объединения разрозненных мероприятий в единую систему целенаправленных действий на всех уровнях и стадиях производственного процесса.

Охрана труда – это система законодательных, социально-экономических, организационных, технологических, гигиенических и лечебно-профилактических мероприятий и средств, обеспечивающих безопасность, сохранение здоровья и работоспособности человека в процессе труда<sup>[6]</sup>.

Правила по охране труда и техники безопасности вводятся в целях предупреждения несчастных случаев, обеспечения безопасных условий труда работающих и являются обязательными для исполнения рабочими, руководящими, инженерно-техническими работниками.

Опасным производственным фактором, согласно [7], называется такой производственный фактор, воздействие которого в определенных условиях приводят к травме или другому внезапному, резкому ухудшению здоровья.

Вредным производственным фактором называется такой производственный фактор, воздействие которого на работающего в определенных условиях приводит к заболеванию или снижению трудоспособности.

### **5.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов**

Производственные условия на рабочем месте характеризуются наличием опасных и вредных факторов, которые классифицируются по группам элементов: физические, химические, биологические, психофизиологические.

Таблица 5.1 – Основные элементы производственного процесса, формирующие опасные и вредные факторы

| Наименование видов работ и параметров производственного процесса | ФАКТОРЫ<br>ГОСТ 12.0.003-74 ССБТ              |                       | Нормативные документы                                                                                                                   |
|------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                  | Вредные                                       | Опасные               |                                                                                                                                         |
| Работа на ПЭВМ,<br>Кафедра ФЭУ НИ<br>ТПУ                         | —                                             | Электрический ток     | ГОСТ 12.1.038-82<br>ССБТ.<br>Электробезопасность                                                                                        |
|                                                                  | Воздействие радиации (ВЧ,УВЧ,СВЧ и так далее) | —                     | СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03<br>Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы.<br>«Гигиенические требования к ПЭВМ и организация работы» |
|                                                                  | —                                             | Пожарная безопасность | Пожаро- и взрывобезопасность промышленных объектов. ГОСТ Р12.1.004-85 ССБТ<br>Пожарная безопасность                                     |

На бакалавра, работающего на компьютере, воздействуют следующие факторы:

- физические: температура и влажность воздуха; шум; статическое электричество; электромагнитное поле низкой частоты; освещённость; наличие излучения;
- психофизиологические.

Психофизиологические опасные и вредные производственные факторы, делятся на: физические перегрузки (статические, динамические) и нервно-психические перегрузки (умственное перенапряжение, монотонность труда, эмоциональные перегрузки).

## **5.2 Обоснование и разработка мероприятий по снижению уровней опасного и вредного воздействия и устранению их влияния на работающих**

### **5.2.1 Организационные мероприятия**

Весь персонал обязан знать и строго соблюдать правила техники безопасности. Обучение персонала технике безопасности и производственной санитарии состоит из вводного инструктажа и инструктажа непосредственно на рабочем месте ответственным лицом.

Проверка знаний правил техники безопасности проводится квалификационной комиссией или лицом ответственным за рабочее место после обучения на рабочем месте. После чего сотруднику присваивается соответствующая его знаниям и опыту работы квалификационная группа по технике безопасности и выдается удостоверение специального образца.

Лица, обслуживающие электроустановки не должны иметь увечий и болезней, мешающих производственной работе. Состояние здоровья устанавливается медицинским освидетельствованием перед устройством на работу.

### **5.2.2 Технические мероприятия**

Рациональная планировка рабочего места предусматривает четкий порядок и постоянство размещения предметов, средств труда и документации. То, что требуется для выполнения работ чаще должно располагаться в зоне легкой досягаемости рабочего пространства, как показано на рисунке 5.1.

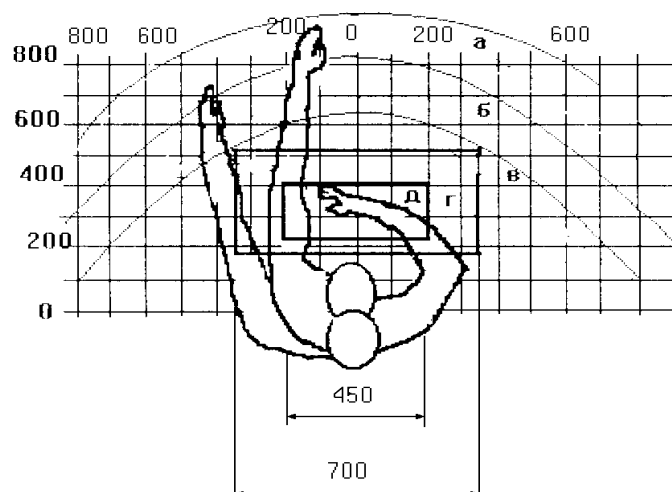


Рисунок 5.1 – Зоны досягаемости рук в горизонтальной плоскости

- где
- а – зона максимальной досягаемости рук;
  - б – зона досягаемости пальцев при вытянутой руке;
  - в – зона легкой досягаемости ладони;
  - г – оптимальное пространство для грубой ручной работы;
  - д – оптимальное пространство для тонкой ручной работы.

Оптимальное размещение предметов труда и документации в зонах досягаемости рук:

- дисплей размещается в зоне а (в центре);
- клавиатура — в зоне г/д;
- системный блок размещается в зоне б (слева);
- принтер находится в зоне а (справа);

документация размещается в зоне легкой досягаемости ладони — в (слева) — литература и документация, необходимая при работе; в выдвижных ящиках стола — литература, не используемая постоянно.

При проектировании письменного стола должны быть учтены следующие требования.

Высота рабочей поверхности стола рекомендуется в пределах 680–800 мм. Высота рабочей поверхности, на которую устанавливается клавиатура, должна быть 650 мм. Рабочий стол должен быть шириной не менее 700 мм и длиной не менее 1400 мм. Должно иметься пространство для ног высотой не менее 600 мм, шириной — не менее 500 мм, глубиной на уровне колен — не менее 450 мм и на уровне вытянутых ног — не менее 650 мм.

Рабочее кресло должно быть подъёмно-поворотным и регулируемым по высоте и углам наклона сиденья и спинки, а так же расстоянию спинки до переднего края сиденья. Рекомендуется высота сиденья над уровнем пола 420–550 мм. Конструкция рабочего кресла должна обеспечивать: ширину и глубину поверхности сиденья не менее 400 мм; поверхность сиденья с заглублённым передним краем.

Монитор должен быть расположен на уровне глаз оператора на расстоянии 500–600 мм. Согласно нормам угол наблюдения в горизонтальной плоскости должен быть не более 45° к нормали экрана. Лучше если угол обзора будет составлять 30°. Кроме того должна быть возможность выбирать уровень контрастности и яркости изображения на экране.

Должна предусматриваться возможность регулирования экрана:

- по высоте +3 см;
- по наклону от 10 до 20 градусов относительно вертикали;
- в левом и правом направлениях.

Клавиатуру следует располагать на поверхности стола на расстоянии 100–300 мм от края. Нормальным положением клавиатуры является её размещение на уровне локтя оператора с углом наклона к горизонтальной плоскости 15°. Более удобно работать с клавишами, имеющими вогнутую поверхность, четырёхугольную форму с закруглёнными углами. Конструкция клавиши должна обеспечивать оператору ощущение щелчка. Цвет клавиш должен контрастировать с цветом панели.

При однообразной умственной работе, требующей значительного нервного напряжения и большого сосредоточения, рекомендуется выбирать

неяркие, малоконтрастные цветочные оттенки, которые не рассеивают внимание (малонасыщенные оттенки холодного зеленого или голубого цветов). При работе, требующей интенсивной умственной или физической напряженности, рекомендуются оттенки тёплых тонов, которые возбуждают активность человека.

### 5.3 Условия безопасной работы

Основные параметры, характеризующие условия труда это микроклимат, шум, вибрация, электромагнитное поле, излучение, освещённость.

Воздух рабочей зоны (микроклимат) производственных помещений определяют следующие параметры: температура, относительная влажность, скорость движения воздуха. Оптимальные и допустимые значения характеристик микроклимата устанавливаются в соответствии с [8] и приведены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Оптимальные и допустимые параметры микроклимата

| Период года           | Температура, °С | Относительная влажность, % | Скорость движения воздуха, м/с |
|-----------------------|-----------------|----------------------------|--------------------------------|
| Холодный и переходный | 23–25           | 40–60                      | 0,1                            |
| Тёплый                | 23–25           | 40                         | 0,1                            |

К мероприятиям по оздоровлению воздушной среды в производственном помещении относятся: правильная организация вентиляции и кондиционирования воздуха, отопление помещений. Вентиляция может осуществляться естественным и механическим путём. В помещение должны подаваться следующие объёмы наружного воздуха: при объёме помещения до 20

м<sup>3</sup> на человека — не менее 30 м<sup>3</sup> в час на человека; при объёме помещения более 40 м<sup>3</sup> на человека и отсутствии выделения вредных веществ допускается естественная вентиляция.

Система отопления должна обеспечивать достаточное, постоянное и равномерное нагревание воздуха. В помещениях с повышенными требованиями к чистоте воздуха должно использоваться водяное отопление. Параметры микроклимата в используемой лаборатории регулируются системой центрального отопления, и имеют следующие значения: влажность — 40%, скорость движения воздуха — 0,1 м/с, температура летом — 20–25 °С, зимой — 13–15 °С. В лаборатории осуществляется естественная вентиляция. Воздух поступает и удаляется через щели, окна, двери. Основной недостаток такой вентиляции в том, что приточный воздух поступает в помещение без предварительной очистки и нагревания.

Шум и вибрация ухудшают условия труда, оказывают вредное воздействие на организм человека, а именно, на органы слуха и на весь организм через центральную нервную систему. В результате этого ослабляется внимание, ухудшается память, снижается реакция, увеличивается число ошибок при работе. Шум может создаваться работающим оборудованием, установками кондиционирования воздуха, осветительными приборами дневного света, а также проникать извне. При выполнении работы на ПЭВМ уровень шума на рабочем месте не должен превышать 50 дБ.

Экран и системные блоки производят электромагнитное излучение. Основная его часть происходит от системного блока и видео-кабеля. Согласно [7] напряженность электромагнитного поля на расстоянии 50 см вокруг экрана по электрической составляющей должна быть не более:

- в диапазоне частот 5Гц–2кГц — 25В/м;
- в диапазоне частот 2кГц–400кГц — 2,5В/м.

Плотность магнитного потока должна быть не более:

- в диапазоне частот 5Гц–2кГц — 250нТл;
- в диапазоне частот 2кГц–400кГц — 25нТл.

Существуют следующие способы защиты от ЭМП:

- увеличение расстояния от источника (экран должен находиться на расстоянии не менее 50 см от пользователя);
- применение приэкранных фильтров, специальных экранов и других средств индивидуальной защиты.

При работе с компьютером источником ионизирующего излучения является дисплей. Под влиянием ионизирующего излучения в организме может происходить нарушение нормальной свертываемости крови, увеличение хрупкости кровеносных сосудов, снижение иммунитета и др. Доза облучения при расстоянии до дисплея 20 см составляет 50 мкбэр/час. По нормам [8] конструкция ЭВМ должна обеспечивать мощность экспозиционной дозы рентгеновского излучения в любой точке на расстоянии 0,05 м от экрана не более 100 мкР/час.

Утомляемость органов зрения может быть связана как с недостаточной освещенностью, так и с чрезмерной освещенностью, а также с неправильным направлением света.

#### **5.4 Электробезопасность**

В зависимости от условий в помещении опасность поражения человека электрическим током увеличивается или уменьшается. Не следует работать с ЭВМ в условиях повышенной влажности (относительная влажность воздуха длительно превышает 75 %), высокой температуры (более 35 °С), наличии токопроводящей пыли, токопроводящих полов и возможности одновременного прикосновения к имеющим соединение с землей металлическим элементам и металлическим корпусом электрооборудования. Оператор ЭВМ работает с электроприборами: компьютером (дисплей, системный блок и т.д.) и

периферийными устройствами. Существует опасность поражения электрическим током в следующих случаях:

- при непосредственном прикосновении к токоведущим частям во время ремонта ЭВМ;
- при прикосновении к нетоковедущим частям, оказавшимся под напряжением (в случае нарушения изоляции токоведущих частей ЭВМ);
- при прикосновении с полом, стенами, оказавшимися под напряжением;
- при коротком замыкании в высоковольтных блоках: блоке питания и блоке дисплейной развёртки.

Мероприятия по обеспечению электробезопасности электроустановок:

- отключение напряжения с токоведущих частей, на которых или вблизи которых будет проводиться работа, и принятие мер по обеспечению невозможности подачи напряжения к месту работы;
- вывешивание плакатов, указывающих место работы;
- заземление корпусов всех установок через нулевой провод;
- покрытие металлических поверхностей инструментов надёжной изоляцией;
- недоступность токоведущих частей аппаратуры (заключение в корпуса электропоражающих элементов, заключение в корпус токоведущих частей).

## **5.5 Пожарная и взрывная безопасность**

В зависимости от характеристики используемых в производстве веществ и их количества, по пожарной и взрывной опасности помещения подразделяются на категории А, Б, В, Г, Д. Так как помещение по степени пожаровзрывоопасности относится к категории В, т.е. к помещениям с твердыми сгорающими веществами, необходимо предусмотреть ряд профилактических мероприятий.

Возможные причины загорания:

- неисправность токоведущих частей установок;
- работа с открытой электроаппаратурой;
- короткие замыкания в блоке питания;
- несоблюдение правил пожарной безопасности;
- наличие горючих компонентов: документы, двери, столы, изоляция кабелей и т.п.

Мероприятия по пожарной профилактике подразделяются на: организационные, технические, эксплуатационные и режимные.

Организационные мероприятия предусматривают правильную эксплуатацию оборудования, правильное содержание зданий и территорий, противопожарный инструктаж рабочих и служащих, обучение производственного персонала правилам противопожарной безопасности, издание инструкций, плакатов, наличие плана эвакуации<sup>[4]</sup>.

К техническим мероприятиям относятся: соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве электропроводов и оборудования, отопления, вентиляции, освещения, правильное размещение оборудования.

К режимным мероприятиям относятся, установление правил организации работ, и соблюдение противопожарных мер. Для предупреждения возникновения пожара от коротких замыканий, перегрузок и т. д. необходимо соблюдение следующих правил пожарной безопасности:

- исключение образования горючей среды (герметизация оборудования, контроль воздушной среды, рабочая и аварийная вентиляция);
- применение при строительстве и отделке зданий негорючих или трудно сгораемых материалов;
- правильная эксплуатация оборудования (правильное включение оборудования в сеть электрического питания, контроль нагрева оборудования);

- правильное содержание зданий и территорий (исключение образования источника воспламенения — предупреждение самовозгорания веществ, ограничение огневых работ);

- обучение производственного персонала правилам противопожарной безопасности;

- издание инструкций, плакатов, наличие плана эвакуации;

- соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве электропроводов и оборудования, отопления, вентиляции, освещения;

- правильное размещение оборудования;

- своевременный профилактический осмотр, ремонт и испытание оборудования.

При возникновении аварийной ситуации необходимо:

- сообщить руководителю;

- позвонить в аварийную службу;

- принять меры в соответствии с инструкцией.

## Заключение

В результате проделанной работы для заданного типа реактора (уран-графитовый с водяным теплоносителем):

- Выполнен предварительный расчет реактора: определены параметры конструктивной схемы ячейки и размеры активной зоны, рассчитаны ядерно-физические характеристики «холодного» реактора; найден эффективный коэффициент размножения  $k_{эф} = 1,709$ .

- Проведена оптимизация параметров ячейки по диаметру твэла, шагу решетки и размеру ячейки «под ключ», выбраны оптимальные размеры ячейки которым соответствует  $k_{эф} = 1,726$ .

- Выполнен расчет горячего реактора при рабочей температуре, рассчитан эффективный коэффициент размножения для «горячего» реактора  $k_{эф} = 1,569$ , определены температурные коэффициенты реактивности.

- Найден спектр плотностей потоков и ценностей нейтронов многогрупповым методом, проведена проверка условия верного выполнения расчета  $k_{эф} = k_{эф}^+ = 1,326$ . По рассчитанным спектрам потоков и ценностей нейтронов в активной зоне составлены константы двухгруппового расчета пространственного распределения нейтронных потоков.

## Список публикаций студента

1. Разработка NiAl матрицы для иммобилизации радиоактивных отходов методом СВС [Электронный ресурс] / И. О. Луцик [и др.] // VI Школа-конференция молодых атомщиков Сибири : сборник тезисов докладов, 14-16 октября 2015 г., г. Томск / Росатом ; Томская область, Администрация ; Сибирский химический комбинат (СХК) ; Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ) ; Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ", Северский технологический институт (СТИ). — Томск: Изд-во СТИ НИЯУ МИФИ, 2015. — [С. 53]. — Заглавие с титульного экрана. — Свободный доступ из сети Интернет. — Adobe Reader.

Режим доступа: <http://www.lib.tpu.ru/fulltext/c/2015/C63/036.pdf>

2. Влияние степени разбавления исходной шихты на фазообразование матрицы полученной методом СВС [Электронный ресурс] / В. С. Кузьмин [и др.] // Энергетика: эффективность, надежность, безопасность : материалы XXI Всероссийской научно-технической конференции, 2-4 декабря 2015 г., Томск в 2 т. / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ) [и др.] ; ред. кол. В. В. Литвак [и др.]. — 2015. — Т. 2. — [С. 405-406]. — Заглавие с титульного экрана. — Свободный доступ из сети Интернет. — Adobe Reader.

Режим доступа: [http://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/14798/1/conference\\_tpu-2015-C15-V1-158.pdf](http://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/14798/1/conference_tpu-2015-C15-V1-158.pdf)

3. Технологические аспекты метода СВС при иммобилизации РАО [Электронный ресурс] / Д. В. Посохов [и др.] // Энергетика: эффективность, надежность, безопасность : материалы XXI Всероссийской научно-технической конференции, 2-4 декабря 2015 г., Томск в 2 т. / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ) [и др.] ; ред.

кол. В. В. Литвак [и др.]. — 2015. — Т. 2. — [С. 275-277]. — Заглавие с титульного экрана. — Свободный доступ из сети Интернет. — Adobe Reader.

4. Зависимость фазообразования от степени разбавления исходной шихты при иммобилизации РАО методом СВС / [Электронный ресурс] / В. С. Кузьмин [и др.] // Актуальные проблемы инновационного развития ядерных технологий Северск, 21-25 марта 2016 г. / Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Северский технологический институт; ред. кол. М.Д. Носков. — 2016. — [С. 35-35a]. — Заглавие с титульного экрана. — Свободный доступ из сети Интернет. — Adobe Reader.

5. Исследование влияния давления прессования на образование алюминидного перовскита полученного методом СВ-синтеза / [Электронный ресурс] / Д. В. Посохов [и др.] // Актуальные проблемы инновационного развития ядерных технологий Северск, 21-25 марта 2016 г. / Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Северский технологический институт; ред. кол. М.Д. Носков. — 2016. — [С. 45-45a]. — Заглавие с титульного экрана. — Свободный доступ из сети Интернет. — Adobe Reader.

6. Разработка мультифазной керамической матрицы на основе перовскита / [Электронный ресурс] / В. С. Кузьмин [и др.] // СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ФИЗИКИ И ТЕХНОЛОГИЙ V Международная молодежная научная школа-конференция Москва 18-23 апреля 2016 года; Тезисы докладов. Часть 2. М.: НИЯУ МИФИ, 2016. – 372 с / Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Физический институт им. П.Н. Лебедева. — 2016. — [С. 61-62]. — Заглавие с титульного экрана. — Свободный доступ из сети Интернет. — Adobe Reader.

Режим

доступа:<http://magistr.mephi.ru/school/files/%D0%A1%D0%B1%D0%BE%D1%80>

%D0%BD%D0%B8%D0%BA%20%D1%82%D0%B5%D0%B7%D0%B8%D1%81  
%D0%BE%D0%B2%20%D0%A7%D0%B0%D1%81%D1%82%D1%8C%202.pdf

7. Разработка матричного материала для иммобилизации радиоактивных отходов в режиме самораспространяющегося высокотемпературного синтеза / [Электронный ресурс] / Д. В. Посохов [и др.] // СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ФИЗИКИ И ТЕХНОЛОГИЙ V Международная молодежная научная школа-конференция Москва 18-23 апреля 2016 года; Тезисы докладов. Часть 2. М.: НИЯУ МИФИ, 2016. – 372 с / Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Физический институт им. П.Н. Лебедева. — 2016. — [С. 81-82]. — Заглавие с титульного экрана. — Свободный доступ из сети Интернет. — Adobe Reader.

Режим

доступа:

<http://magistr.mephi.ru/school/files/%D0%A1%D0%B1%D0%BE%D1%80%D0%BD%D0%B8%D0%BA%20%D1%82%D0%B5%D0%B7%D0%B8%D1%81%D0%BE%D0%B2%20%D0%A7%D0%B0%D1%81%D1%82%D1%8C%202.pdf>

8. Estimation of the parameters of self-propagating high-temperature synthesis for obtaining a matrix material based on perovskite ceramics for immobilization of actinide fraction / [Электронный ресурс] / I. O. Lutsik [и др.] // СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ФИЗИКИ И ТЕХНОЛОГИЙ V Международная молодежная научная школа-конференция Москва 18-23 апреля 2016 года; Тезисы докладов. Часть 2. М.: НИЯУ МИФИ, 2016. – 372 с / Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Физический институт им. П.Н. Лебедева. — 2016. — [С. 62-63]. — Заглавие с титульного экрана. — Свободный доступ из сети Интернет. — Adobe Reader.

Режим

доступа:

<http://magistr.mephi.ru/school/files/%D0%A1%D0%B1%D0%BE%D1%80%D0%BD%D0%B8%D0%BA%20%D1%82%D0%B5%D0%B7%D0%B8%D1%81%D0%BE%D0%B2%20%D0%A7%D0%B0%D1%81%D1%82%D1%8C%201.pdf>

9. Влияние степени разбавления исходной шихты на фазообразование матрицы полученной методом СВС [Электронный ресурс] / В. С. Кузьмин [и др.] // РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕТИКА: Двадцать вторая Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов (25—26 февраля 2016 г., Москва): Тез. докл. В 3 т. — 356 с. / НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МЭИ» [и др.]. — 2016. — Т. 3. — [С. 20]. — Заглавие с титульного экрана. — Свободный доступ из сети Интернет. — Adobe Reader.  
Режим доступа: [http://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/14798/1/conference\\_tpu-2015-C15-V1-158.pdf](http://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/14798/1/conference_tpu-2015-C15-V1-158.pdf)

10. Определение степени разбавления матрицы на основе  $\text{Ni}_2\text{Al}_3$  предназначенных для иммобилизации РАО в режиме технологического горения [Электронный ресурс] / В. С. Кузьмин [и др.] // РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕТИКА: Двадцать вторая Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов (25—26 февраля 2016 г., Москва): Тез. докл. В 3 т. — 356 с. / НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МЭИ» [и др.]. — 2016. — Т. 3. — [С. 20]. — Заглавие с титульного экрана. — Свободный доступ из сети Интернет. — Adobe Reader.  
Режим доступа:

11. Влияние давления прессования на фазообразования матрицы на основе алюминид никеля [Электронный ресурс] / Д. В. Посохов [и др.] // РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕТИКА: Двадцать вторая Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов (25—26 февраля 2016 г., Москва): Тез. докл. В 3 т. — 356 с. / НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МЭИ» [и др.]. — 2016. — Т. 3. — [С. 21]. — Заглавие с титульного экрана. — Свободный доступ из сети Интернет. — Adobe Reader.

Режим доступа:

12. Включение никелиевой добавки в перовскитоподобную матрицу на основе алюминия [Электронный ресурс] / В. С. Кузьмин [и др.] // Физико-технические проблемы в науке, промышленности и медицине: сборник научных трудов VIII Международной научно-практической конференции. – Томск, 2016. – 262 с. / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ). — 2016. — [С. 73]. — Заглавие с титульного экрана. — Свободный доступ из сети Интернет. — Adobe Reader.

Режим доступа:

## Список использованных источников

1. Об основах охраны труда в Российской Федерации: Федеральный закон от 17 июля 1999 №181 – ФЗ // Российская газ. – 1999. – 24.07. – С. 4
2. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы «Гигиенические требования к ПЭВМ и организации работы» [Текст]. – Взамен СанПиН 2.2.2.542-96; введ. 2003-06-30. – М: Российская газета, 2003. – 3 с.
3. ГОСТ 12.1.038-82. ССБТ. Электробезопасность [Текст]. – Введ. 1983-01-07. – М.: Издательство стандартов, 1988. – 2 с.
4. СНиП 21-01-97. Пожарная безопасность зданий и сооружений [Текст]. – Взамен СНиП 2.01.02-85; введ. 1998-01-01. – М.: Госстрой России, ГУП ЦПП, 1999. – 6 с.
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. Физические величины: Справочник / Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991.
7. Абагян Л.П. Групповые константы для расчета ядерных реакторов и защиты: Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1981.
8. 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

Таблица А.1 – Микросечения и макросечения для материалов «холодного» ядерного реактора

| Материал   | $N, \text{см}^{-3}$   | Микросечение, барн |            |            |               | Макросечение, $\text{см}^{-1}$ |            |                       |                       | Логарифмический декремент | Замедляющая способность |
|------------|-----------------------|--------------------|------------|------------|---------------|--------------------------------|------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------|-------------------------|
|            |                       | $\sigma_a$         | $\sigma_f$ | $\sigma_s$ | $\sigma_{tr}$ | $\Sigma_a$                     | $\Sigma_f$ | $\Sigma_s$            | $\Sigma_{tr}$         | $\xi$                     | $\xi \Sigma_s$          |
| $U^{235}$  | $4,560 \cdot 10^{21}$ | 496,076            | 422,71     | 15         | 511,076       | 2,262                          | 1,928      | 0,068                 | 2,331                 | $8,487 \cdot 10^{-3}$     | $5,805 \cdot 10^{-4}$   |
| $U^{238}$  | $1,824 \cdot 10^{22}$ | 2,050              | —          | 9          | 11,05         | 0,037                          | —          | 0,164                 | 0,202                 | $8,380 \cdot 10^{-3}$     | $1,376 \cdot 10^{-3}$   |
| $O^{16}$   | $4,560 \cdot 10^{22}$ | —                  | —          | 3,750      | 3,600         | —                              | —          | 0,171                 | 0,164                 | 0,120                     | 0,021                   |
| $H_2O$     | $2,465 \cdot 10^{22}$ | —                  | —          | —          | —             | 0,022                          | —          | 2,670                 | 2,310                 | —                         | 1,350                   |
| $Cr^{52}$  | $1,778 \cdot 10^{22}$ | 2,345              | —          | 4,200      | 6,503         | 0,042                          | —          | 0,075                 | 0,116                 | 0,038                     | 0,003                   |
| $Al^{27}$  | $6,937 \cdot 10^{20}$ | 0,182              | —          | 1,400      | 1,554         | $1,265 \cdot 10^{-4}$          | —          | $9,712 \cdot 10^{-4}$ | $1,078 \cdot 10^{-3}$ | 0,072                     | $7,021 \cdot 10^{-5}$   |
| $Ti^{48}$  | $2,255 \cdot 10^{21}$ | 4,388              | —          | 4,200      | 8,546         | 0,041                          | —          | 0,09                  | 0,019                 | 0,041                     | $3,892 \cdot 10^{-4}$   |
| $Ni^{59}$  | $6,374 \cdot 10^{22}$ | 3,480              | —          | 17         | 20,310        | 0,222                          | —          | 1,084                 | 1,295                 | 0,034                     | 0,036                   |
| $Fe^{56}$  | $2,255 \cdot 10^{21}$ | 1,914              | —          | 11,400     | 13,200        | 0,04                           | —          | 0,026                 | 0,030                 | 0,035                     | $9,072 \cdot 10^{-4}$   |
| $UO_2$     | $2,280 \cdot 10^{22}$ | —                  | —          | —          | —             | 2,300                          | 1,928      | 0,404                 | 2,696                 | —                         | 0,022                   |
| $XH77THOP$ | —                     | —                  | —          | —          | —             | 0,278                          | —          | 1,196                 | 1,460                 | —                         | 0,041                   |

## Приложение Б

Таблица Б.1 – Микросечения и макросечения для материалов «горячего» ядерного реактора

| Материал   | $N, \text{см}^{-3}$   | Микросечение, барн |            |            |               | Макросечение, $\text{см}^{-1}$ |            |                       |                       | Логарифмический декремент | Замедляющая способность |
|------------|-----------------------|--------------------|------------|------------|---------------|--------------------------------|------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------|-------------------------|
|            |                       | $\sigma_a$         | $\sigma_f$ | $\sigma_s$ | $\sigma_{tr}$ | $\Sigma_a$                     | $\Sigma_f$ | $\Sigma_s$            | $\Sigma_{tr}$         | $\xi$                     | $\xi \Sigma_s$          |
| $U^{235}$  | $4,560 \cdot 10^{21}$ | 273,779            | 233,294    | 15         | 511,076       | 1,248                          | 1,064      | 0,068                 | 2,331                 | $8,487 \cdot 10^{-3}$     | $5,805 \cdot 10^{-4}$   |
| $U^{238}$  | $1,824 \cdot 10^{22}$ | 1,227              | —          | 9          | 11,05         | 0,022                          | —          | 0,164                 | 0,202                 | $8,380 \cdot 10^{-3}$     | $1,376 \cdot 10^{-3}$   |
| $O^{16}$   | $4,560 \cdot 10^{22}$ | —                  | —          | 3,750      | 3,600         | —                              | —          | 0,171                 | 0,164                 | 0,120                     | 0,021                   |
| $H_2O$     | $2,465 \cdot 10^{22}$ | —                  | —          | —          | —             | 0,0221                         | —          | 2,670                 | 2,310                 | —                         | 1,350                   |
| $Cr^{52}$  | $1,778 \cdot 10^{22}$ | 1,404              | —          | 4,200      | 6,503         | 0,025                          | —          | 0,075                 | 0,116                 | 0,038                     | 0,003                   |
| $Al^{27}$  | $6,937 \cdot 10^{20}$ | 0,109              | —          | 1,400      | 1,554         | $7,573 \cdot 10^{-5}$          | —          | $9,712 \cdot 10^{-4}$ | $1,078 \cdot 10^{-3}$ | 0,072                     | $7,021 \cdot 10^{-5}$   |
| $Ti^{48}$  | $2,255 \cdot 10^{21}$ | 2,627              | —          | 4,200      | 8,546         | 0,006                          | —          | 0,09                  | 0,019                 | 0,041                     | $3,892 \cdot 10^{-4}$   |
| $Ni^{59}$  | $6,374 \cdot 10^{22}$ | 2,084              | —          | 17         | 20,310        | 0,133                          | —          | 1,084                 | 1,295                 | 0,034                     | 0,036                   |
| $Fe^{56}$  | $2,255 \cdot 10^{21}$ | 1,146              | —          | 11,400     | 13,200        | 0,003                          | —          | 0,026                 | 0,030                 | 0,035                     | $9,072 \cdot 10^{-4}$   |
| $UO_2$     | $2,280 \cdot 10^{22}$ | —                  | —          | —          | —             | 1,271                          | 1,064      | 0,404                 | 2,696                 | —                         | 0,022                   |
| $XH77TIOF$ | —                     | —                  | —          | —          | —             | 0,166                          | —          | 1,196                 | 1,460                 | —                         | 0,041                   |

## Приложение В

Таблица В.1 – Таблица многогрупповых констант

| № группы | $\Sigma_a, \text{см}^{-1}$ | $\Sigma_s, \text{см}^{-1}$ | $\Sigma_{tr}, \text{см}^{-1}$ | $D, \text{см}$ | $\nu_f \Sigma_f, \text{см}^{-1}$ | $\varepsilon_i$ | $B^2, \text{см}^{-2}$ | $I^0, \text{отн.ед.}$ | $I^1, \text{отн.ед.}$ | $I^2, \text{отн.ед.}$ | $I^3, \text{отн.ед.}$ | $I^4, \text{отн.ед.}$ | $I^5, \text{отн.ед.}$ | $I^+, \text{отн.ед.}$ |
|----------|----------------------------|----------------------------|-------------------------------|----------------|----------------------------------|-----------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 1        | 0,017                      | 0,068                      | 0,072                         | 4,626          | 0,032                            | 0,02            | 0,0012                | 0,007                 | 0,007                 | 0,007                 | 0,007                 | 0,007                 | 0,007                 | 0,035                 |
| 2        | 0,008                      | 0,076                      | 0,088                         | 3,767          | 0,017                            | 0,098           | 0,0013                | 0,038                 | 0,038                 | 0,038                 | 0,038                 | 0,038                 | 0,038                 | 0,035                 |
| 3        | 0,006                      | 0,088                      | 0,108                         | 3,075          | 0,017                            | 0,19            | 0,0013                | 0,075                 | 0,075                 | 0,075                 | 0,075                 | 0,075                 | 0,076                 | 0,035                 |
| 4        | 0,006                      | 0,097                      | 0,122                         | 2,738          | 0,014                            | 0,268           | 0,0013                | 0,117                 | 0,117                 | 0,117                 | 0,117                 | 0,117                 | 0,118                 | 0,035                 |
| 5        | 0,003                      | 0,129                      | 0,210                         | 1,586          | 0,005                            | 0,196           | 0,0014                | 0,100                 | 0,100                 | 0,100                 | 0,100                 | 0,100                 | 0,101                 | 0,034                 |
| 6        | 0,003                      | 0,150                      | 0,233                         | 1,431          | 0,005                            | 0,135           | 0,0014                | 0,109                 | 0,109                 | 0,109                 | 0,109                 | 0,109                 | 0,110                 | 0,034                 |
| 7        | 0,004                      | 0,202                      | 0,271                         | 1,229          | 0,006                            | 0,058           | 0,0015                | 0,080                 | 0,080                 | 0,080                 | 0,080                 | 0,080                 | 0,080                 | 0,035                 |
| 8        | 0,005                      | 0,262                      | 0,310                         | 1,074          | 0,007                            | 0,022           | 0,0015                | 0,058                 | 0,058                 | 0,058                 | 0,058                 | 0,058                 | 0,058                 | 0,035                 |
| 9        | 0,007                      | 0,314                      | 0,362                         | 0,920          | 0,008                            | 0,009           | 0,0015                | 0,050                 | 0,050                 | 0,050                 | 0,050                 | 0,050                 | 0,049                 | 0,035                 |
| 10       | 0,009                      | 0,368                      | 0,409                         | 0,815          | 0,010                            | 0,003           | 0,0015                | 0,041                 | 0,041                 | 0,041                 | 0,041                 | 0,041                 | 0,041                 | 0,035                 |
| 11       | 0,012                      | 0,409                      | 0,453                         | 0,736          | 0,013                            | 0,001           | 0,0015                | 0,036                 | 0,036                 | 0,036                 | 0,036                 | 0,036                 | 0,036                 | 0,035                 |
| 12       | 0,016                      | 0,426                      | 0,477                         | 0,699          | 0,017                            | –               | 0,0015                | 0,034                 | 0,034                 | 0,034                 | 0,034                 | 0,034                 | 0,034                 | 0,035                 |
| 13       | 0,021                      | 0,435                      | 0,499                         | 0,668          | 0,021                            | –               | 0,0015                | 0,032                 | 0,032                 | 0,032                 | 0,032                 | 0,032                 | 0,032                 | 0,035                 |
| 14       | 0,029                      | 0,440                      | 0,491                         | 0,679          | 0,028                            | –               | 0,0015                | 0,030                 | 0,030                 | 0,030                 | 0,030                 | 0,030                 | 0,030                 | 0,035                 |
| 15       | 0,041                      | 0,443                      | 0,501                         | 0,666          | 0,043                            | –               | 0,0015                | 0,028                 | 0,028                 | 0,028                 | 0,028                 | 0,028                 | 0,028                 | 0,036                 |
| 16       | 0,052                      | 0,445                      | 0,497                         | 0,670          | 0,061                            | –               | 0,0015                | 0,026                 | 0,026                 | 0,026                 | 0,026                 | 0,026                 | 0,026                 | 0,036                 |
| 17       | 0,074                      | 0,445                      | 0,552                         | 0,604          | 0,083                            | –               | 0,0015                | 0,024                 | 0,024                 | 0,024                 | 0,024                 | 0,024                 | 0,023                 | 0,036                 |
| 18       | 0,094                      | 0,447                      | 0,543                         | 0,614          | 0,120                            | –               | 0,0015                | 0,021                 | 0,021                 | 0,021                 | 0,021                 | 0,021                 | 0,021                 | 0,037                 |
| 19       | 0,140                      | 0,447                      | 0,619                         | 0,538          | 0,160                            | –               | 0,0015                | 0,018                 | 0,017                 | 0,017                 | 0,017                 | 0,017                 | 0,017                 | 0,037                 |

Продолжение приложения В

Продолжение таблицы В.1

| № группы | $\Sigma_a, \text{см}^{-1}$ | $\Sigma_s, \text{см}^{-1}$ | $\Sigma_{tr}, \text{см}^{-1}$ | $D, \text{см}$ | $\nu_f \Sigma_f, \text{см}^{-1}$ | $\mathcal{E}_i$ | $B^2, \text{см}^{-2}$ | $I^0, \text{отн.ед.}$ | $I^1, \text{отн.ед.}$ | $I^2, \text{отн.ед.}$ | $I^3, \text{отн.ед.}$ | $I^4, \text{отн.ед.}$ | $I^+, \text{отн.ед.}$ |
|----------|----------------------------|----------------------------|-------------------------------|----------------|----------------------------------|-----------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 20       | 0,189                      | 0,447                      | 0,644                         | 0,517          | 0,155                            | —               | 0,0015                | 0,014                 | 0,014                 | 0,014                 | 0,014                 | 0,014                 | 0,037                 |
| 21       | 0,257                      | 0,447                      | 0,701                         | 0,475          | 0,146                            | —               | 0,0015                | 0,011                 | 0,011                 | 0,011                 | 0,011                 | 0,011                 | 0,037                 |
| 22       | 0,049                      | 0,447                      | 0,482                         | 0,691          | 0,079                            | —               | 0,0015                | 0,012                 | 0,012                 | 0,012                 | 0,012                 | 0,012                 | 0,050                 |
| 23       | 0,084                      | 0,447                      | 0,519                         | 0,642          | 0,138                            | —               | 0,0015                | 0,011                 | 0,011                 | 0,011                 | 0,011                 | 0,011                 | 0,050                 |
| 24       | 0,129                      | 0,447                      | 0,565                         | 0,589          | 0,252                            | —               | 0,0015                | 0,009                 | 0,009                 | 0,009                 | 0,009                 | 0,009                 | 0,051                 |
| 25       | 0,322                      | 0,447                      | 0,760                         | 0,439          | 0,611                            | —               | 0,0015                | 0,006                 | 0,006                 | 0,006                 | 0,006                 | 0,006                 | 0,051                 |
| 26       | 0,465                      | 0,000                      | 0,904                         | 0,369          | 0,922                            | —               | 0,0015                | 0,014                 | 0,014                 | 0,014                 | 0,014                 | 0,014                 | 0,052                 |

# Продолжение приложения В

## Таблица В.2 – Таблица переходов

| №  | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      | 9      | 10     | 11     | 12     | 13     | 14     | 15     | 16     | 17     | 18     | 19     | 20     | 21     | 22     | 23     | 24     | 25     |
|----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1  |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| 2  | 0,0204 |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| 3  | 0,0092 | 0,0293 |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| 4  | 0,0110 | 0,0153 | 0,0397 |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| 5  | 0,0103 | 0,0125 | 0,0188 | 0,0446 |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| 6  | 0,0093 | 0,0103 | 0,0152 | 0,0264 | 0,0782 |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| 7  | 0,0049 | 0,0052 | 0,0079 | 0,0136 | 0,0262 | 0,0873 |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| 8  | 0,0018 | 0,0021 | 0,0037 | 0,0065 | 0,0129 | 0,0314 | 0,1134 |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| 9  | 0,0007 | 0,0009 | 0,0016 | 0,0032 | 0,0066 | 0,0169 | 0,0474 | 0,1508 |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| 10 | 0,0003 | 0,0003 | 0,0007 | 0,0013 | 0,0030 | 0,0078 | 0,0220 | 0,0597 | 0,1772 |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| 11 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0003 | 0,0006 | 0,0014 | 0,0036 | 0,0102 | 0,0276 | 0,0732 | 0,2064 |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| 12 |        | 0,0001 | 0,0001 | 0,0003 | 0,0006 | 0,0017 | 0,0047 | 0,0128 | 0,0339 | 0,0866 | 0,2287 |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| 13 |        |        | 0,0001 | 0,0001 | 0,0003 | 0,0008 | 0,0022 | 0,0060 | 0,0157 | 0,0402 | 0,0965 | 0,2381 |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| 14 |        |        |        | 0,0001 | 0,0001 | 0,0004 | 0,0010 | 0,0028 | 0,0073 | 0,0187 | 0,0448 | 0,1006 | 0,2430 |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| 15 |        |        |        |        | 0,0001 | 0,0002 | 0,0005 | 0,0013 | 0,0034 | 0,0087 | 0,0208 | 0,0467 | 0,1027 | 0,2457 |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| 16 |        |        |        |        |        | 0,0001 | 0,0002 | 0,0006 | 0,0016 | 0,0040 | 0,0096 | 0,0217 | 0,0477 | 0,1043 | 0,2470 |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| 17 |        |        |        |        |        |        | 0,0001 | 0,0003 | 0,0007 | 0,0019 | 0,0045 | 0,0101 | 0,0221 | 0,0484 | 0,1048 | 0,2480 |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| 18 |        |        |        |        |        |        |        | 0,0002 | 0,0003 | 0,0009 | 0,0021 | 0,0047 | 0,0103 | 0,0225 | 0,0487 | 0,1053 | 0,2484 |        |        |        |        |        |        |        |        |
| 19 |        |        |        |        |        |        |        |        | 0,0003 | 0,0004 | 0,0010 | 0,0022 | 0,0048 | 0,0104 | 0,0226 | 0,0489 | 0,1053 | 0,2492 |        |        |        |        |        |        |        |
| 20 |        |        |        |        |        |        |        |        |        | 0,0003 | 0,0005 | 0,0010 | 0,0022 | 0,0048 | 0,0105 | 0,0227 | 0,0489 | 0,1058 | 0,2495 |        |        |        |        |        |        |
| 21 |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        | 0,0004 | 0,0005 | 0,0010 | 0,0023 | 0,0049 | 0,0105 | 0,0227 | 0,0491 | 0,1058 | 0,2492 |        |        |        |        |        |
| 22 |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        | 0,0004 | 0,0005 | 0,0011 | 0,0023 | 0,0049 | 0,0105 | 0,0228 | 0,0491 | 0,1058 | 0,2491 |        |        |        |        |
| 23 |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        | 0,0004 | 0,0005 | 0,0011 | 0,0023 | 0,0049 | 0,0106 | 0,0228 | 0,0491 | 0,1058 | 0,2490 |        |        |        |
| 24 |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        | 0,0004 | 0,0005 | 0,0011 | 0,0023 | 0,0049 | 0,0106 | 0,0228 | 0,0491 | 0,1058 | 0,2490 |        |        |
| 25 |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        | 0,0004 | 0,0005 | 0,0011 | 0,0023 | 0,0049 | 0,0106 | 0,0228 | 0,0491 | 0,1058 | 0,2490 |        |
| 26 |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        | 0,0004 | 0,0009 | 0,0020 | 0,0043 | 0,0092 | 0,0198 | 0,0426 | 0,0917 | 0,1975 | 0,4466 |

Продолжение приложения В

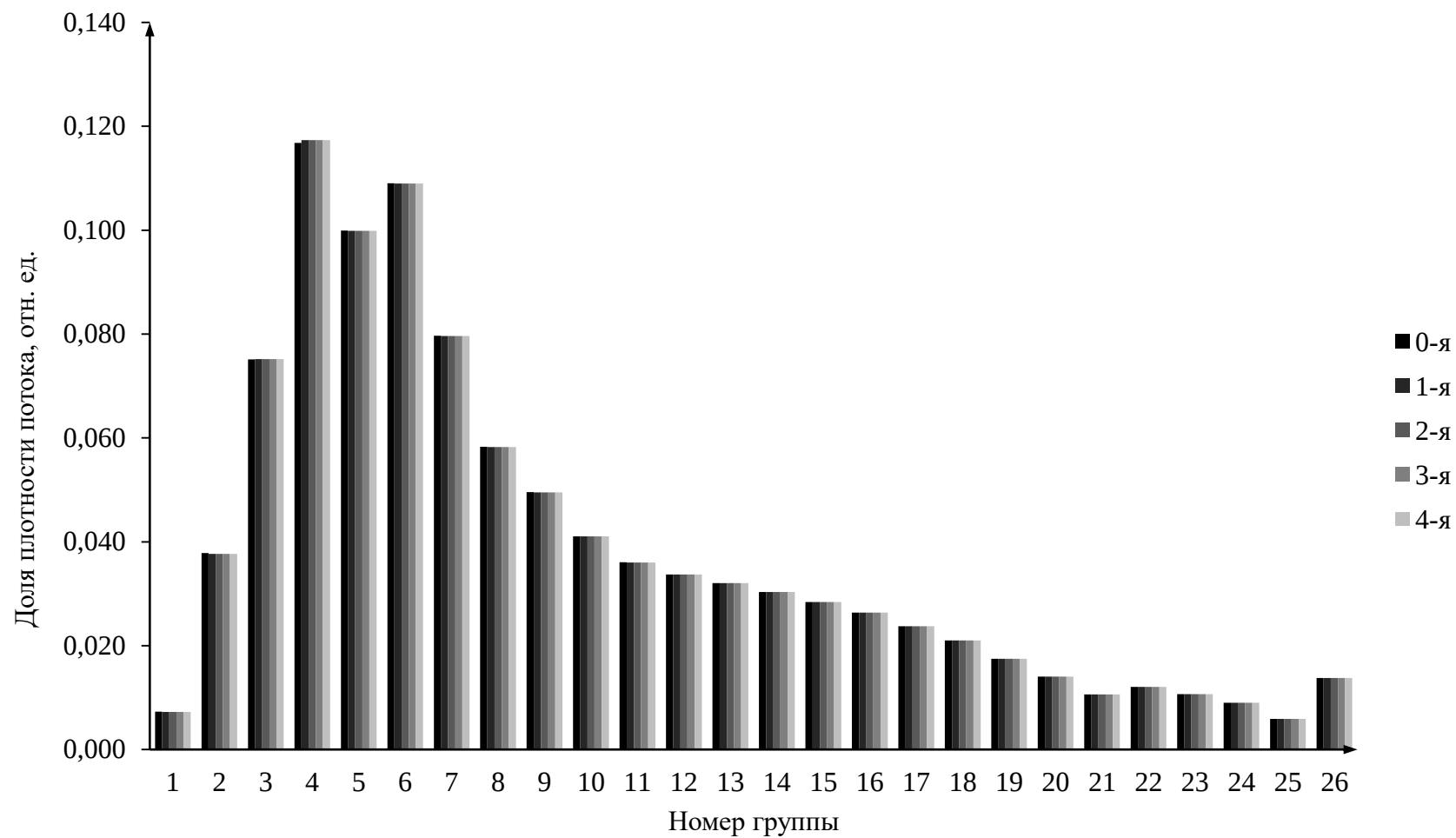


Рисунок В.1 – Поток нейтронов

Продолжение приложения В

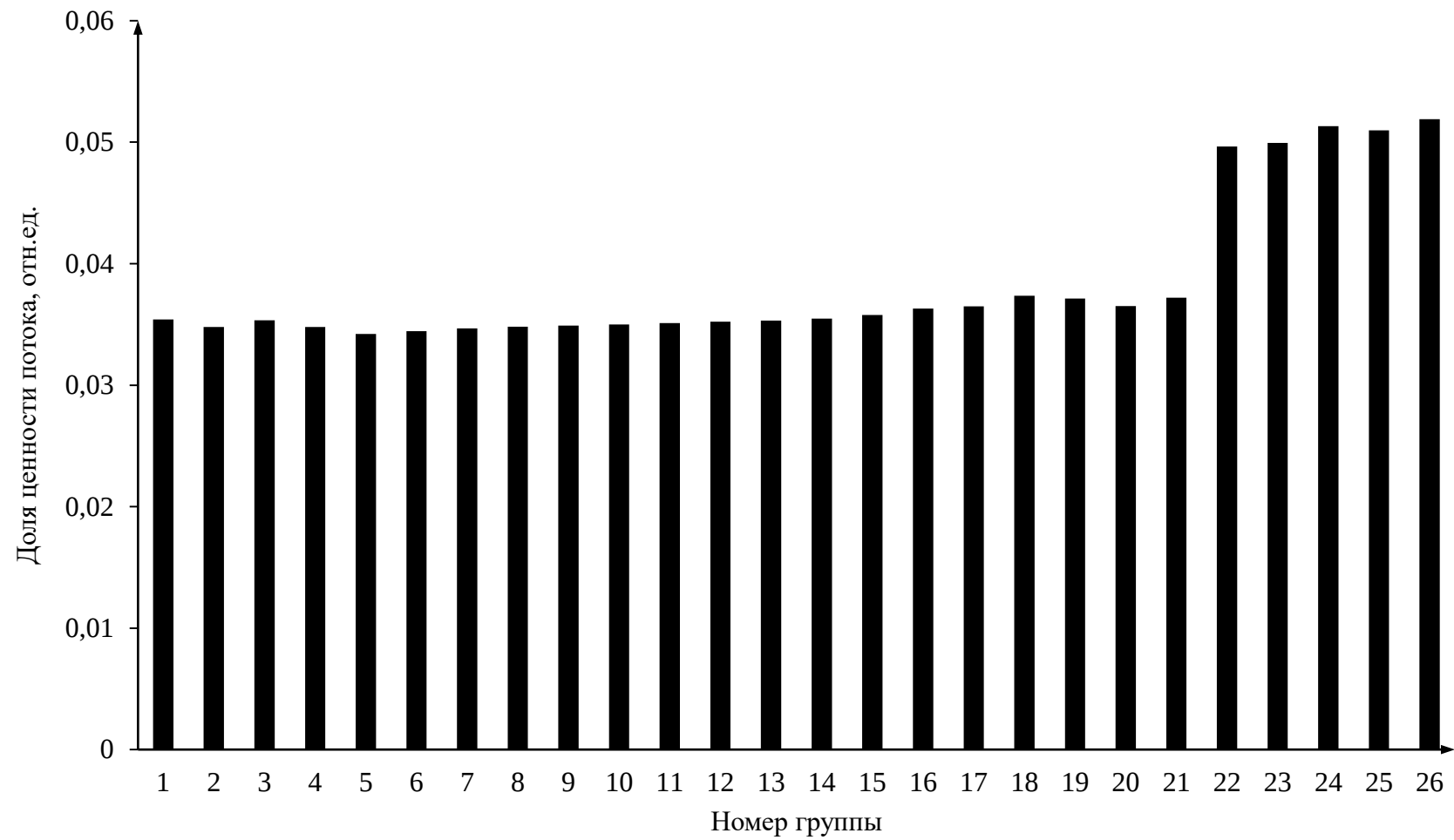


Рисунок В.2 – Ценности нейтронов

## Приложение Г

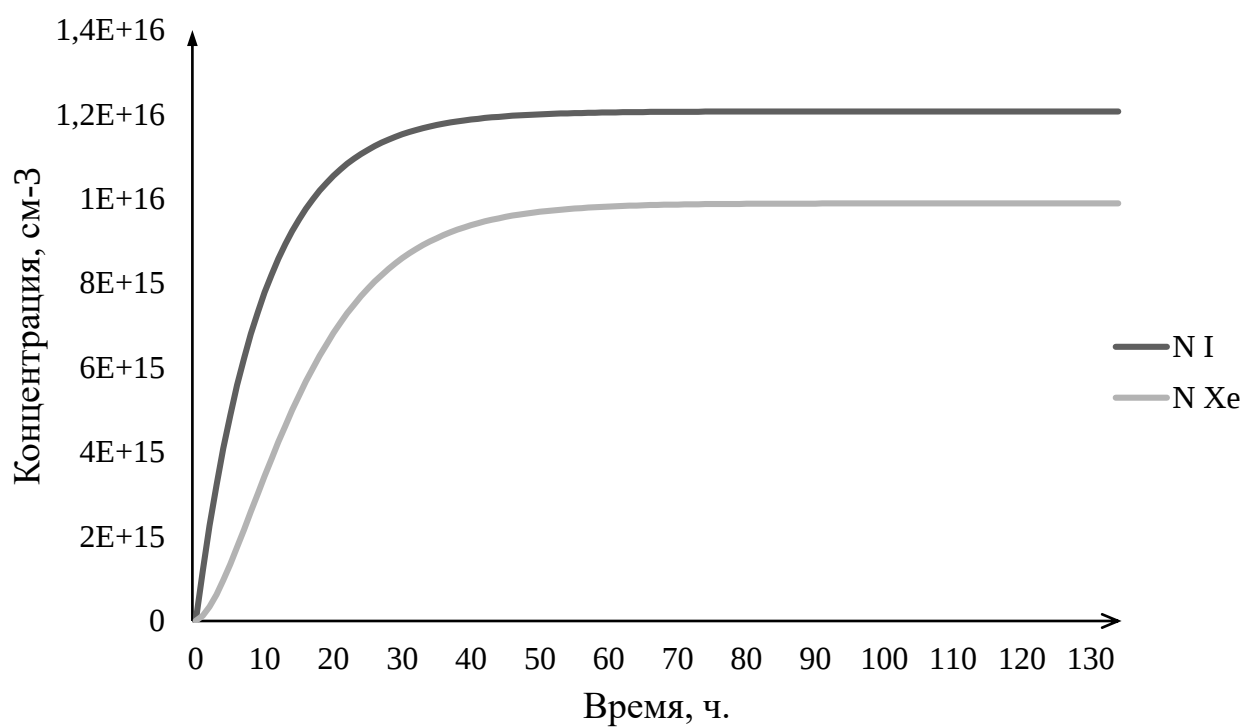


Рисунок Г.1 – Динамика изменения концентрации Xe и I при достижении равновесного состояния

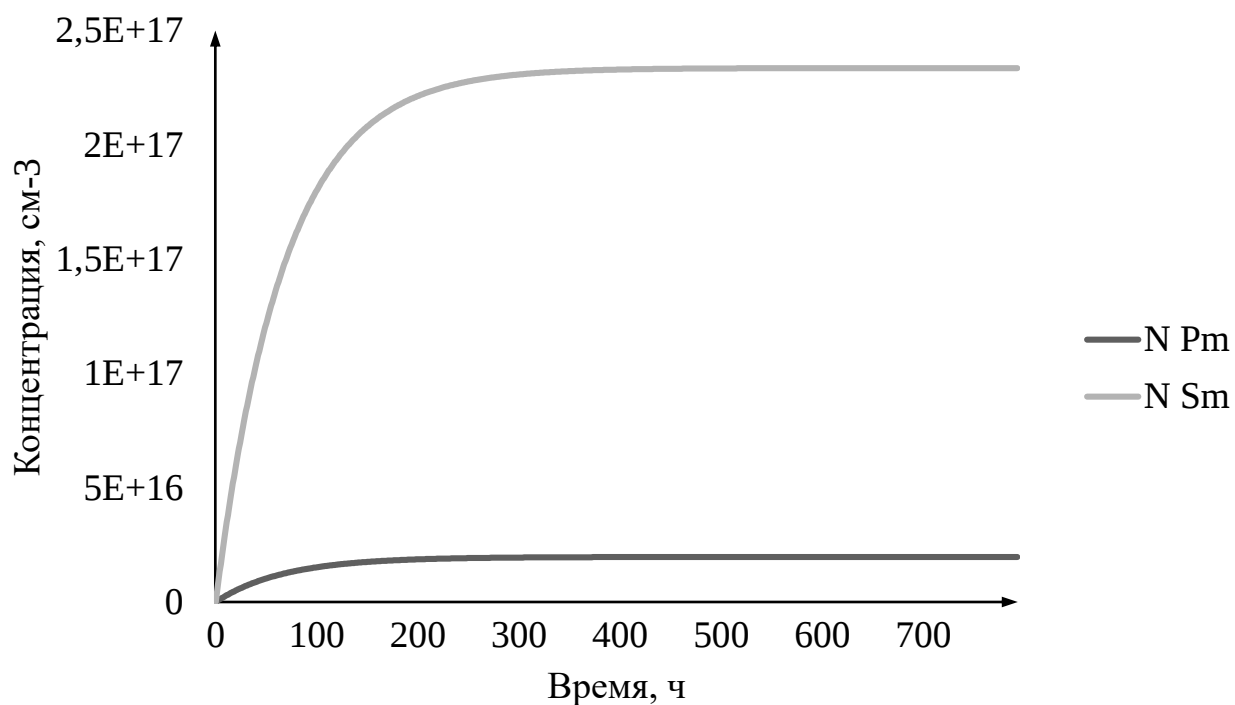


Рисунок Г.2 – Динамика изменения концентрации Sm и Pm при достижении равновесного состояния

## Продолжение приложения Г

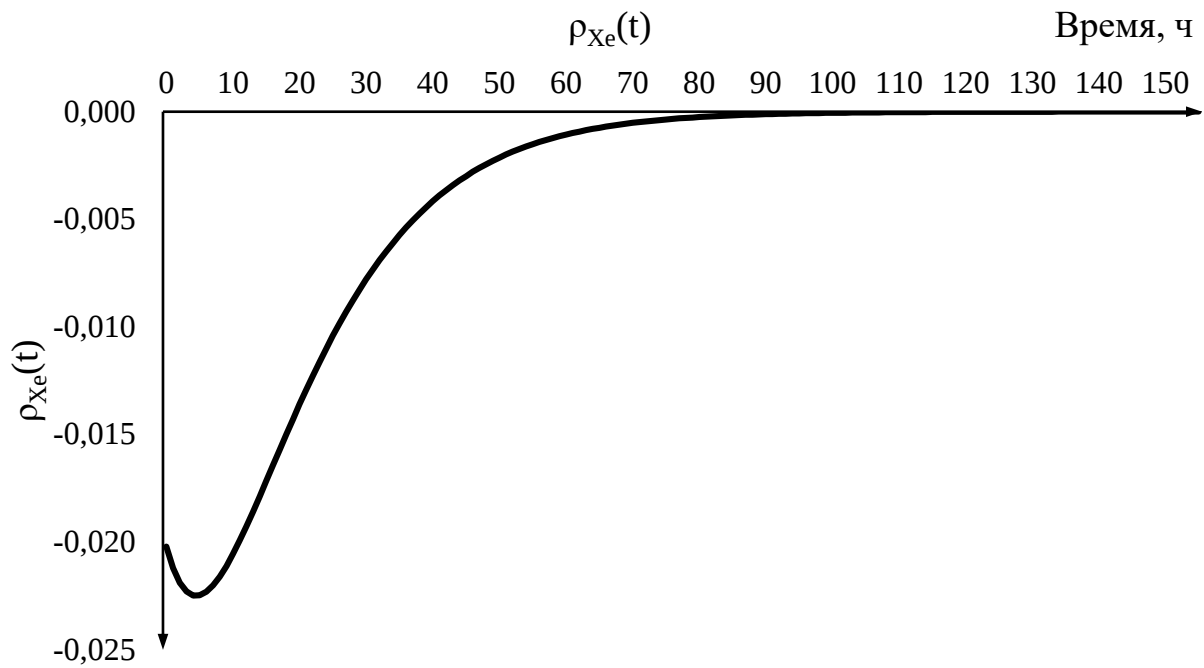


Рисунок Г.3 – Динамика изменения реактивности при отравлении Xe после останова ядерного реактора

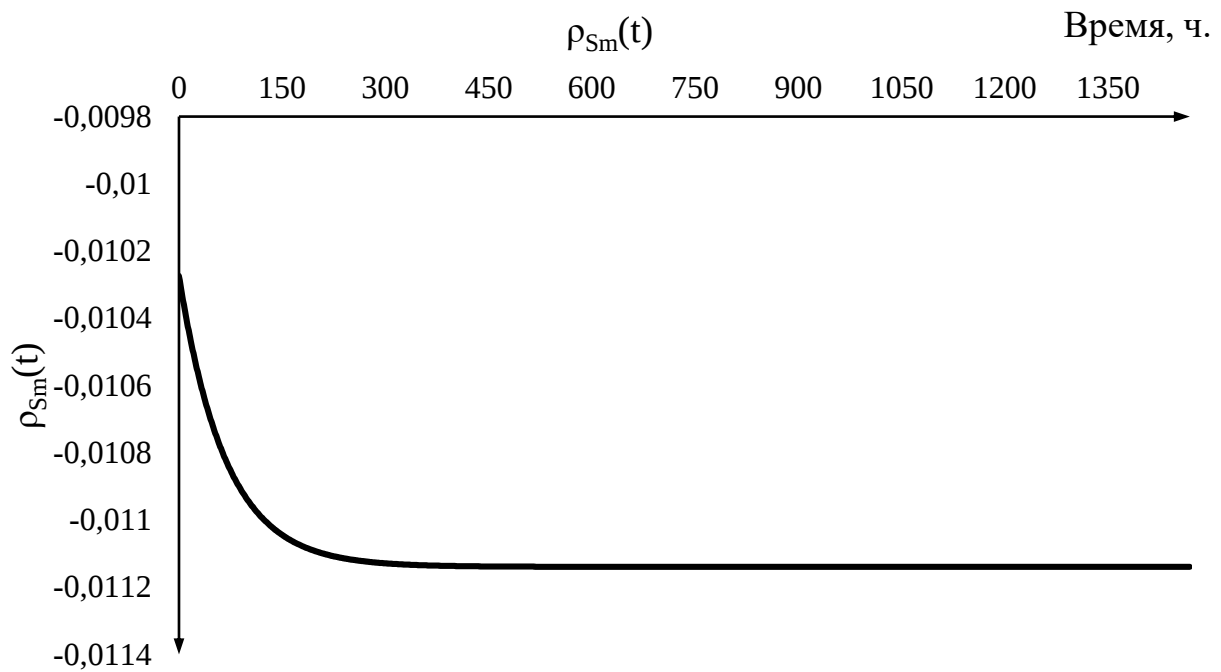


Рисунок Г.4 – Динамика изменения реактивности при отравлении Sm после останова ядерного реактора





