

**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

**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

Тема работы
<b>Нейтронно-физический расчет реактора типа УГР с жидкометаллическим теплоносителем</b>

УДК 621.039.536

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0A2B	Зайцев В.С.		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель каф. ФЭУ ФТИ	Селиваникова О.В.	к.ф.-м.н.		

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

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

По разделу «Социальная ответственность»

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

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

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

## ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ООП

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
<b>Общекультурные компетенции</b>	
P1	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.
P2	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.
P3	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.
P4	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.
P5	Владеть одним из иностранных языков на уровне не ниже разговорного.
P6	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 результата</b>	<b>Результат обучения (выпускник должен быть готов)</b>
<b>Профессиональные компетенции</b>	
P7	Использовать основные законы естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности, применять методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования.
P8	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).
P9	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.
P10	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 результата</b>	<b>Результат обучения (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  
 \_\_\_\_\_ 16.05.2015 О.Ю. Долматов  
 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

**ЗАДАНИЕ**

**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

Бакалаврской работы (бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)
---

Студенту:

Группа	ФИО
0А2В	Зайцев В.С.

Тема работы:

Нейтронно-физический расчет реактора типа УГР мощностью 2800 МВт
Утверждена приказом проректора-директора (директора) (дата, номер)

Срок сдачи студентом выполненной работы:	29.06.2015
--	------------

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<p><b>Исходные данные к работе</b>                      (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.).</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Тепловая мощность 2800 [МВт]</li> <li>- Ядерное горючее UC</li> <li>- Обогащение урана 1,4 %</li> <li>- Температура на входе 300 [°C]</li> <li>- Температура на выходе 580 [°C]</li> <li>- ТВЭЛы стержневые с наружным охлаждением</li> <li>- Материалы оболочек твэлов и кассет сталь IX18H9T</li> </ul>
<p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b>                      (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).</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Нейтронно-физический расчет «холодного» реактора</li> <li>- Нейтронно-физический расчет «горячего» реактора</li> <li>- Многогрупповой расчет</li> <li>- Свертка</li> <li>- Расчёт защиты от нейтронов</li> </ul>
<p><b>Перечень графического материала</b>                      (с точным указанием обязательных чертежей)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Презентация</li> <li>- Чертеж ячейки</li> </ul>

<b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b>	
<b>Раздел</b>	<b>Консультант</b>
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Сечина А.А.
Социальная ответственность	Гоголева Т.С.
<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 ФТИ	Селиваникова О.В	к.ф-м.н.		16.05.2016

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
0A2B	Зайцев Виктор Сергеевич		16.05.2016

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

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
0A2B	Зайцев Виктор Сергеевич

<b>Институт</b>	<b>ФТИ</b>	<b>Кафедра</b>	<b>ФЭУ</b>
<b>Уровень образования</b>	бакалавр	<b>Направление/специальность</b>	14.03.02 Ядерные физика и технологии/ Ядерные реакторы и энергетические установки

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

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

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

1. <i>Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i>	Оценочная карта конкурентных технических решений
2. <i>Планирование и формирование бюджета научных исследований</i>	Иерархическая структура работ
3. <i>Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования</i>	SWOT-анализ

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

1. <i>Оценка конкурентоспособности технических решений</i>
2. <i>Матрица SWOT</i>
3. <i>Альтернативы проведения НИ</i>
4. <i>График проведения и бюджет НИ</i>
5. <i>Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИ</i>

**Дата выдачи задания для раздела по линейному графику**

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Доцент каф. МЕН ИСГТ	Сечина А.А.	к.х.н.		16.05.2016

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
0A2B	Зайцев Виктор Сергеевич		16.05.2016

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
0А2В	Зайцев Виктор Сергеевич

<b>Институт</b>	<b>ФТИ</b>	<b>Кафедра</b>	<b>ФЭУ</b>
<b>Уровень образования</b>	бакалавр	<b>Направление/специальность</b>	14.03.02 Ядерные физика и технологии/ Ядерные реакторы и энергетические установки

**Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:**

1. <i>Описание рабочего места (рабочей зоны) на предмет возникновения:</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– вредных проявлений факторов производственной среды (электромагнитные поля, ионизирующее излучение, микроклимат, освещение, шумы, вибрации);</li> <li>– опасных проявлений факторов производственной среды (электрической, пожарной и взрывной природы).</li> </ul>
2. <i>Знакомство и отбор законодательных и нормативных документов по теме</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– электробезопасность;</li> <li>– пожаровзрывобезопасность;</li> <li>– требования охраны труда при работе на ПЭВМ.</li> </ul>

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

1. <i>Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– действие фактора на организм человека;</li> <li>– приведение допустимых норм с необходимой размерностью (с ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ);</li> <li>– прилагаемые средства защиты (коллективные и индивидуальные).</li> </ul>
2. <i>Анализ выявленных опасных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, средства защиты);</li> <li>- пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия).</li> </ul>

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	
---	--

**Задание выдал консультант:**

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

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
0A2B	Зайцев Виктор 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:	29.06.2016
--	------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
16.05.2015	<i>Выдача задания</i>	
19.05.2015	<i>Выбор конструктивной схемы</i>	
26.05.2015	<i>Расчет критических параметров проектируемого реактора</i>	
02.06.2015	<i>Расчет характеристик «горячего реактора», многогрупповой нейтронно-физический расчет</i>	
09.06.2015	<i>Расчет защиты реактора</i>	
26.06.2015	<i>Сдача работы</i>	

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель каф. ФЭУ ФТИ	Селиваникова О.В.	к.ф.-м.н.		16.05.2015

**СОГЛАСОВАНО:**

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ФЭУ	О.Ю. Долматов	к.ф.-м.н., доцент		16.05.2015

## Реферат

Выпускная квалификационная работа 105 с., 4 рис., 22 табл., 12 источников, 3 прил., 1 чертеж.

Ключевые слова: ядерный реактор; нейтронно-физический расчет; многогрупповой расчет; свертка; расчет защиты от нейтронов; финансовый менеджмент; социальная ответственность.

Объектом исследования является уран-графитовый реактор с жидкометаллическим теплоносителем.

Цель работы – нейтронно-физический расчет реактора, проектирование защиты от нейтронного излучения, оценка финансовой составляющей дипломной работы и всех факторов, повлиявших на выполнение работы.

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, спроектирована защита от нейтронного излучения, оценена финансовая составляющая работа и описаны внешние факторы, которые влияли на работу.

Основные конструктивные, технологические и технико-эксплуатационные характеристики: ядерный реактор, мощностью 2800 МВт, с топливом УС и обогащением 1,4 %, с теплоносителем 56 % Na + 44 % K, использующий в качестве конструкционных материалов сталь IX18H9T.

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

Область применения: ядерные реакторы.

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.

**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.

## Обозначения и сокращения

МэВ – мегаэлектронВольт;

РБМК – реактор большой мощности канальный;

ТКР – температурный коэффициент реактивности;

ТЭР – температурный эффект реактивности;

УГР – уран–графитовый реактор.

АКЗ – активная зона

## Оглавление

Введение.....	14
1 Обзор литературы .....	15
1.1 Уран-графитовые реакторы .....	15
1.2 Уран-графитовые реакторы с жидкометаллическим теплоносителем .....	15
1.3 Тепловыделяющие элементы реакторов .....	16
1.4 Ядерно-топливные материалы .....	17
1.5 Материалы оболочек тепловыделяющих элементов .....	18
1.6 Топливные кассеты и сборки.....	18

## Введение

Основная задача нейтронно-физического расчета реактора состоит в физическом обосновании конструкции и определении совокупности физических параметров реактора, удовлетворяющего поставленным требованиям. Выбрав и обосновав конструктивную схему реактора, необходимо далее провести оценочный тепловой расчет, в результате которого определяются размеры активной зоны.

Главная искомая величина в физическом расчете – коэффициент размножения. Для определения оптимального коэффициента размножения физико-нейтронный расчет ведется в нескольких вариантах. Расчетные варианты отличаются отношением объемов ядерного горючего, замедлителя, теплоносителя и конструкционных материалов.

Далее рассчитываются характеристики «горячего» реактора, определяется температурный коэффициент реактивности. Так же рассчитываются спектры нейтронов и их ценности в активной зоне в 26-групповом диффузионном приближении.

Цель работы: выполнить оценочный нейтронно-физический расчет реактора, состоящий в физическом обосновании конструкции и определении совокупности физических параметров, удовлетворяющего поставленным требованиям.

Задачи:

- Обзор эксплуатационных параметров и конструктивных особенностей уран графитовых реакторов с водяным теплоносителем.
- Проведение нейтронно-физического расчета «горячего» и «холодного» реактора, а так же многогруппового расчета реактора для определения спектра и ценностей нейтронов.
- Проведение расчёта первичной защиты реактора.

## **1 Обзор литературы**

### **1.1 Уран-графитовые реакторы**

Уран-графитовые реакторы – одни из самых распространенных типов реакторов в мире. Это связано с тем, что графит от природы имеет очень низкое сечение поглощения нейтронов, хорошо проводит тепло, термостоек и химически довольно инертен. При проектировании и эксплуатации ядерных реакторов с графитом в качестве замедлителя возникают следующие особенности:

- с графитом сочетаются большинство теплоносителей, в том числе высокотемпературные;
- коэффициент воспроизводства у таких реакторов больше, чем в ВВЭР;
- функционирование системы с перегрузкой работающего реактора;
- при использовании в качестве теплоносителя натрия, число конструкционных материалов в активной зоне сводится к минимуму.

При столь весомых достоинствах реакторов, использующих в качестве замедлителя графит, они имеют и недостатки:

- малая замедляющая способность при большой длине замедления, что приводит к большим размерам активной зоны и низкой плотности теплосъема;
- при длительных радиационных воздействиях происходит изменение физико-механических свойств и размеров графита, происходит накопление внутренней энергии;
- пористость графита позволяет теплоносителю проникать в него, а это плохо влияет на реактивность.

### **1.2 Уран-графитовые реакторы с жидкометаллическим теплоносителем**

Активная зона реактора состоит из 233 ячеек (модулей квадратной формы). Ячейка реактора состоит из графитового замедлителя и центральной

трубки рабочего канала с внутренним диаметром 70,8 мм. Внутри трубки располагаются сборки тепловыделяющих элементов. Каждая сборка включает 19 элементов стержневого типа. Тепловыделяющий элемент состоит из 10 топливных блоков слабообогащенного диоксида урана диаметром 11,56 мм и длиной 304,8 мм. Обогащение ядерного горючего изотопом  $U^{235}$  составляет 1,4%. Ядерное горючее покрыто защитной оболочкой из циркония толщиной 0,254 мм. Хороший тепловой контакт между сердечником и оболочкой достигается посредством заполнения зазора толщиной 0,25 мм жидким натрием.

### **1.3 Тепловыделяющие элементы реакторов**

ТВЭЛы и ТВС являются важнейшими элементами энергетического реактора. Их конструкция должна обеспечивать надежную работу при высоких плотностях энерговыделения и больших глубинах выгорания. Твэлы выполняют важную функцию барьеров безопасности – предотвращают выход высокоактивных продуктов деления в теплоноситель.

Когда дело доходит до выбора конструкции твэла и его размеров, стоит учесть следующие соображения:

- чем больше отношение поверхности к объему, тем меньше напряженность единицы поверхности твэла;
- с возрастанием отношения поверхности к объему твэла уменьшаются размеры активной зоны, но одновременно возрастает доля конструкционных материалов, снижаются прочностные и вибрационные характеристики твэлов;
- поперечные размеры твэлов должны уменьшаться с увеличением температуры теплоносителя и тепловых потоков, а также с уменьшением теплопроводности топлива;

- конструкция и размеры ТВЭЛов существенно влияют на параметры размножающей среды и загрузку топлива в реактор.

На данный момент существует множество конструктивных форм ТВЭЛов, но чаще всего применяются ТВЭЛы стержневой и трубчатой формы, которые имеют оболочку из сплавов на основе железа, алюминия, циркония. В данной работе были выбраны ТВЭЛы стержневой формы.

ТВЭЛ состоит из топливного сердечника, оболочки, которая отделяет сердечник от теплоносителя и замедлителя, и концевых деталей, служащих для герметизации полости сердечника. Внутри оболочки есть свободный объем для компенсации разности термических расширений сердечника и оболочки. Так же этот объем компенсирует увеличение объема при работе. Этот зазор не превышает  $0,5 \div 2$  мм. Для улучшения теплопередачи этот зазор наполняют газом или жидким металлом. Помимо радиального зазора, необходимо учесть газовые полости, где будут накапливаться газообразные продукты деления. Эти полости могут быть сделаны в виде осевого зазора на концах ТВЭЛ (за пределами активной зоны), или в виде отверстия по центру топливной таблетки, распределенного по длине, либо в форме углублений на стыках таблеток, входящих в состав сердечника.

#### **1.4 Ядерно-топливные материалы**

Карбид урана (UC) обладает высокой радиационной стойкостью, высокой температурой плавления ( $2400$  °C), твердый, хрупкий. UC обладает большой плотностью по урану и однородной кубической структурой без фазовых превращений вплоть до точки плавления (плотность  $13,63$  г/см<sup>3</sup>). Коэффициент воспроизводства у карбида урана выше, чем у окисного топлива.

## **1.5 Материалы оболочек тепловыделяющих элементов**

Оболочки твэл работают в очень трудных условиях – длительное воздействие высоких температур и полей облучения, давления, тепловых потоков, коррозионное воздействие теплоносителя, топлива и продуктов деления. Поэтому к ним предъявляются очень жесткие требования:

- небольшое сечение поглощения нейтронов;
- высокая механическая прочность и неизменность формы под действием температуры и радиации;
- большая теплопроводность;
- коррозионная и эрозионная стойкость в теплоносителе и совместимость с ядерным горючим.

Толщину оболочки твэл выбирают из условий обеспечения достаточной прочности.

## **1.6 Топливные кассеты и сборки**

Кассета – это конструктивный ансамбль из твэлов, который должен обеспечить установку, размещение и извлечение твэлов, а так же надежное их охлаждение.

Кассета состоит из следующих частей:

- рабочая часть – твэлы, свободно размещенные в узлах дистанцирующих решеток;
- концевые детали – головка и хвостовик – для захвата при перегрузке и для крепления кассеты в активной зоне;
- корпус кассеты.

