

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

---

Институт Физико-технический

Направление подготовки 14.04.02 Ядерные физика и технологии

Кафедра Физико-энергетических установок

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

| Тема работы                                                                          |  |  |  |  |
|--------------------------------------------------------------------------------------|--|--|--|--|
| <b>Выход газообразных продуктов деления под оболочку ТВЭЛ для реактора ВВЭР-1200</b> |  |  |  |  |
| УДК 621.039.548                                                                      |  |  |  |  |

Студент

| Группа | ФИО                      | Подпись | Дата |
|--------|--------------------------|---------|------|
| 0АМ4Г  | Непеин Дмитрий Сергеевич |         |      |

Руководитель

| Должность                 | ФИО          | Ученая степень,<br>звание | Подпись | Дата |
|---------------------------|--------------|---------------------------|---------|------|
| Доцент кафедры<br>ФЭУ ФТИ | Колпаков Г.Н | к. ф.-м. н.               |         |      |

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

| Должность               | ФИО             | Ученая степень,<br>звание | Подпись | Дата |
|-------------------------|-----------------|---------------------------|---------|------|
| Доцент каф. МЕН<br>ИСГТ | Верховская М.В. | к.Экон.н.                 |         |      |

По разделу «Социальная ответственность»

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

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

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

## Планируемые результаты обучения

| Код результата                             | Результат обучения                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|--------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b><i>Профессиональные компетенции</i></b> |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| P1                                         | Применять глубокие, математические, естественнонаучные, социально-экономические и профессиональные знания для теоретических и экспериментальных исследований в области использования ядерной энергии, ядерных материалов, систем учета, контроля и физической защиты ядерных материалов, технологий радиационной безопасности, медицинской физики и ядерной медицины, изотопных технологий и материалов в профессиональной деятельности. |
| P2                                         | Ставить и решать инновационные инженерно-физические задачи, реализовывать проекты в области использования ядерной энергии, ядерных материалов, систем учета, контроля и физической защиты ядерных материалов, технологий радиационной безопасности, медицинской физики и ядерной медицины, изотопных технологий и материалов.                                                                                                            |
| P3                                         | Создавать теоретические, физические и математические модели, описывающие конденсированное состояние вещества, распространение и взаимодействие ионизирующих излучений с веществом и живой материей, физику кинетических явлений, процессы в реакторах, ускорителях, процессы и механизмы переноса радиоактивности в окружающей среде.                                                                                                    |
| P4                                         | Разрабатывать новые алгоритмы и методы: расчета современных физических установок и устройств; исследования изотопных технологий и материалов; измерения характеристик полей ионизирующих излучений; оценки количественных характеристик ядерных материалов; измерения радиоактивности объектов окружающей среды; исследований в радиозоологии, медицинской физике и ядерной медицине.                                                    |
| P5                                         | Оценивать перспективы развития ядерной отрасли, медицины, анализировать радиационные риски и сценарии потенциально возможных аварий, разрабатывать меры по снижению рисков и обеспечению ядерной и радиационной безопасности руководствуясь законами и нормативными документами, составлять экспертное заключение.                                                                                                                       |
| P6                                         | Проектировать и организовывать инновационный бизнес, разрабатывать и внедрять новые виды продукции и технологий, формировать эффективную стратегию и активную политику риск-менеджмента на предприятии, применять методы оценки качества и результативности труда персонала, применять знание основных положений патентного законодательства и авторского права Российской Федерации.                                                    |
| <b><i>Общекультурные компетенции</i></b>   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| P7                                         | Демонстрировать глубокие знания социальных, этических и культурных аспектов инновационной профессиональной деятельности.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| P8                                         | Самостоятельно учиться и непрерывно повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| P9                                         | Активно владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в иноязычной среде, разрабатывать документацию, презентовать результаты профессиональной деятельности.                                                                                                                                                                                                                                                                |
| P10                                        | Эффективно работать индивидуально и в коллективе, демонстрировать ответственность за результаты работы и готовность следовать корпоративной культуре организации.                                                                                                                                                                                                                                                                        |

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

Институт: Физико-технический

Направление подготовки: (специальность): 14.04.02 Ядерная физика и технологии

Кафедра: Физико-энергетических установок

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. Кафедрой

\_\_\_\_\_ Долматов О.Ю.

(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

### ЗАДАНИЕ

#### на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

|                          |
|--------------------------|
| Магистерской диссертации |
|--------------------------|

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

Студенту:

| Группа | ФИО                      |
|--------|--------------------------|
| 0АМ4Г  | Непеин Дмитрий Сергеевич |

Тема работы:

|                                                                                  |                      |
|----------------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| Выход газообразных продуктов деления из под оболочки ТВЭЛ для реактора ВВЭР-1200 |                      |
| Утверждена приказом директора (дата, номер)                                      | 1618/с от 26.02.2016 |

|                                          |           |
|------------------------------------------|-----------|
| Срок сдачи студентом выполненной работы: | 8.06.2016 |
|------------------------------------------|-----------|

#### ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

|                                                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|-------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Исходные данные к работе</b>                                               | Обзорно-аналитическая литература, содержащая информацию по реактору ВВЭР-1200 и газообразным продуктам деления, образующиеся под оболочкой ТВЭЛ                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| <b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b> | <p>введение: цель и задачи работы, область применения и актуальность темы</p> <p>основная часть: описание реакторной установки ВВЭР-1200; описание ядерного топлива и активной зоны реактора;</p> <p>изучение эксплуатационных свойств оксидного топлива; изучение поведения газообразных продуктов деления в оксидном топливе; анализ выхода ГПД под оболочку ТВЭЛ; проведение экспериментальных расчетов давления оказывающих влияние на оболочку; изучение прочностных характеристик; технико-экономический расчет дополнительного энергоблока; разработка производственной</p> |

|                                                                                         |                                                                                                                                                                                         |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                         | безопасности при проведении экспериментов (в соответствии со стандартами и инструкциями по технике безопасности); изучение устройства локализации расплава ( радиационная безопасность) |
| <b>Перечень графического материала</b>                                                  |                                                                                                                                                                                         |
| <b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b>                       |                                                                                                                                                                                         |
| <b>Раздел</b>                                                                           | <b>Консультант</b>                                                                                                                                                                      |
| Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение                         | Верховская М.В.                                                                                                                                                                         |
| Социальная ответственность                                                              | Гоголева Т.С.                                                                                                                                                                           |
| Иностранный язык                                                                        | Демьяненко Н.В.                                                                                                                                                                         |
| <b>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</b> |                                                                                                                                                                                         |
| Description of reactor installation WWER-1200                                           |                                                                                                                                                                                         |
|                                                                                         |                                                                                                                                                                                         |

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

**Задание выдал руководитель:**

| Должность                 | ФИО          | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|---------------------------|--------------|------------------------|---------|------|
| Доцент кафедры<br>ФЭУ ФТИ | Колпаков Г.Н | к. ф.-м. н.            |         |      |

**Задание принял к исполнению студент:**

| Группа | ФИО                      | Подпись | Дата |
|--------|--------------------------|---------|------|
| 0АМ4Г  | Непеин Дмитрий Сергеевич |         |      |

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА

### «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

| Группа | ФИО                      |
|--------|--------------------------|
| 0АМ4Г  | Непеин Дмитрий Сергеевич |

| Институт            | Физико-технический | Кафедра                   | ФЭУ                                                                              |
|---------------------|--------------------|---------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| Уровень образования | Магистратура       | Направление/специальность | 14.04.02 Ядерные физика и технологии/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 | — оценочная карта конкурентных; технических решений;<br>— рентабельность энергоблока.                                                                                  |
| 2. Планирование и формирование бюджета научных исследований                                                                        | — иерархическая структура работ;<br>— SWOT-анализ;<br>— эксплуатационные расходы на строительство энергоблока;<br>— расходы связанные с производством. электроэнергии. |
| 3. Оценка ресурсной, финансовой, социальной, бюджетной эффективности научного исследования                                         | — определение ресурсоэффективности проекта;<br>— определение капитальных затрат;<br>— строительство дополнительного энергоблока.                                       |

#### Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)

|                                                     |
|-----------------------------------------------------|
| 1. Оценочная карта конкурентных технических решений |
| 2. Матрица SWOT                                     |

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

| Должность            | ФИО             | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|----------------------|-----------------|------------------------|---------|------|
| Доцент каф. МЕН ИСГТ | Верховская М.В. | к.ЭКОН.Н.              |         |      |

Задание принял к исполнению студент:

| Группа | ФИО                      | Подпись | Дата |
|--------|--------------------------|---------|------|
| 0АМ4Г  | Непеин Дмитрий Сергеевич |         |      |

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

| Группа | ФИО                      |
|--------|--------------------------|
| 0АМ4Г  | Непеин Дмитрий Сергеевич |

| Институт            | Физико-технический | Кафедра                   | ФЭУ                                                                                  |
|---------------------|--------------------|---------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Уровень образования | Магистратура       | Направление/специальность | 14.04.02 Ядерные физика и технологии/<br>Ядерные реакторы и энергетические установки |

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

|                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. Описание рабочего места (рабочей зоны, технологического процесса, механического оборудования) на предмет возникновения: | <ul style="list-style-type: none"> <li>– вредных факторов производственной среды (микроклимат, освещение, шумы, электромагнитные поля, ионизирующее излучение);</li> <li>– опасных факторов производственной среды (электрической, пожарной и взрывной природы).</li> </ul> <p>Радиационная безопасность реакторной установки ВВЭР-1200:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– устройство локализации расплава;</li> <li>– условия сохранения целостности защитной оболочки;</li> <li>– функционирование в условиях ЗПА;</li> <li>– оценка безопасности.</li> </ul> |
| 2. Знакомство и отбор законодательных и нормативных документов по теме:                                                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>– электробезопасность, пожаробезопасность, требования при работе на ПЭВМ, радиационная безопасность.</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>– воздействие на организм человека;</li> <li>– приведение допустимых норм;</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<br>ФТИ | Гоголева Т.С. | к.ф.-м.н.              |         |      |

Задание принял к исполнению студент:

| Группа | ФИО                      | Подпись | Дата |
|--------|--------------------------|---------|------|
| 0АМ4Г  | Непеин Дмитрий Сергеевич |         |      |

## Реферат

Магистерская диссертация 119 страниц, 15 рисунков, 20 таблиц, 16 источников.

Ключевые слова: выход газообразных продуктов деления, поведение газов в оксидном топливе, выделение газов под оболочку твэлов, прочностной расчет, контроль герметичности оболочек твэлов, безопасность, герметичность

Объектом исследования является твэл в реакторе ВВЭР

Цель работы – оценить выходы газообразных продуктов деления под оболочку твэл для реактора ВВЭР-1200

Задачи работы – выполнить расчет выхода газообразных продуктов деления под оболочку усовершенствованного твэл повышенной мощности реактора ВВЭР-1200; провести теплогидравлический расчет для определения температурного поля твэлов, расчет давления газообразных продуктов деления при различных температурах, а также с учетом степени выгорания ядерного топлива.

В процессе исследования проводились изучения поведения газообразных продуктов деления под оболочкой твэл для реактора типа ВВЭР

В результате исследования было изучено поведение газа под оболочкой твэл и влияние на прочностные характеристики.

Степень внедрения: высокая.

Область применения: ядерная физика, эксплуатации на реакторных установках типа ВВЭР.

В разделе финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение был проведен технико-экономический расчет дополнительного энергоблока ВВЭР

В разделе социальная ответственность был выполнен анализ вредных и опасных факторов, способов защиты человека на рабочем месте, разработаны мероприятия в условиях чрезвычайных ситуаций природного и техногенного

характера. Так же рассмотрен раздел радиационной безопасности, а именно, рассмотрено устройство локализации расплава.

Выпускная квалификационная работа выполнена в текстовом редакторе Microsoft Word 10.0

## **Перечень принятых сокращений**

АЭС – атомная электростанция

РУ – реакторная установка

ТУ – технические условия

ВВЭР – водо-водяной энергетический реактор

В-320 – ВВЭР-100

АЭС-2006 – ВВЭР-1200

ТВЭЛ – тепловыделяющий элемент

ТВС – тепловыделяющая сборка

ГПД – газообразные продукты деления

СВРК – система внутриреакторного контроля

ВКУ – внутрикорпусные устройства

ПЗ – предварительная защита

БЗТ – блок защитных труб

СВРД – сборка внутриреакторных детекторов

СУЗ – система управления и защиты реактора

ВКУ – внутрикорпусные устройства

ЗПА – запроектная авария

КИП – контрольно-измерительные приборы

МРЗ – максимальное расчетное землетрясение

НУЭ – нормальные условия эксплуатации

ННУЭ – нарушение нормальных условий эксплуатации

ПОЖА – пластины из оксидов железа и алюминия

ГОЖА – гранулы из оксидов железа и алюминия

УЛР – устройство локализации расплава

РПУ – резервный пульт управления

## Оглавление

|                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----|
| Введение.....                                                                     | 11 |
| Глава 1 Описание реактора ВВЭР-1200.....                                          | 13 |
| 1.1 Активная зона .....                                                           | 17 |
| 1.2 Теплоделяющая сборка .....                                                    | 18 |
| 1.3 ТВЭЛ и топливо .....                                                          | 24 |
| Глава 2 Выбор материалов и обоснование конструкции твэлов.....                    | 29 |
| 2.1 Условия эксплуатации и требования к твэлам.....                               | 29 |
| 2.2 Требования к материалам твэлов .....                                          | 32 |
| 2.3 Проблемы обоснования работоспособности твэлов.....                            | 38 |
| 2.4 Эксплуатационные свойства оксидного топлива .....                             | 40 |
| 2.4.1 Физические, теплофизические и механические свойства оксидного топлива ..... | 41 |
| 2.4.2 Выход газов из оксидного топлива .....                                      | 43 |
| 2.4.2.1 Поведение газов в оксидном топливе .....                                  | 44 |
| 2.4.2.2 Выделение газов под оболочку твэла .....                                  | 45 |
| 2.4.2.3 Факторы влияющие на выход ГПД.....                                        | 46 |
| 2.4.2.4 Расчет выхода газов из оксидного топлива.....                             | 48 |
| Список публикаций.....                                                            | 50 |

## Введение

В настоящее время приоритетной задачей в атомной энергетике является безопасность эксплуатации ядерных реакторов, защита жизни и здоровья человека, а также охрана окружающей среды. Нормативными документами для обеспечения нераспространения в окружающую среду и минимизации выхода радиоактивности предписывается контроль за радиоактивностью на разных барьерах.

Существуют следующие барьеры на пути выхода радиоактивности за пределы атомной станции: топливная матрица, оболочка твэла, границы 1-го контура, гермооболочка и биологическая защита энергоблока. В этой связи важнейшей задачей является обеспечение целостности оболочек твэлов и повышение их надежности.

В данной работе исследуемым объектом является тепловыделяющий элемент, который содержит топливную матрицу из обогащенной двуокиси урана, а также оболочку из циркониевых сплавов и другие конструкционные элементы. Факторы, которые ограничивают нормальную эксплуатацию твэлов, относятся давление газовых продуктов деления под оболочкой твэлов и механические напряжения в оболочке при ее взаимодействии с топливной таблеткой.

Актуальность данной диссертации заключается в исследовании возможности повышении мощности реакторной установки, при этом не меняя технологии и конструкции тепловыделяющих элементов, при этом сохраняя выход газообразных радиоактивных продуктов деления на минимальном уровне.

Целью данной работы автор ставит перед собой оценку выхода газообразных продуктов деления из под оболочки твэл для реактора ВВЭР-1200.

Для достижения данной цели должны быть выполнены следующие задачи:

- выполнение расчета выхода газообразных продуктов деления под оболочку усовершенствованного ТВЭЛ повышенной мощности реактора ВВЭР-1200;
- проведение теплогидравлического расчета для определения температурного поля ТВЭЛОВ, расчет давления газообразных продуктов деления при различных температурах, а также с учетом степени выгорания ядерного топлива;
- проведение прочностного расчета оболочки на целостность.

## Глава 1 Описание реактора ВВЭР-1200

Оборудование реакторной установки с реактором типа ВВЭР-1200 разрабатывается и обосновывается для режимов нормальной эксплуатации, представляющих основной технологический процесс, который включает стационарные режимы на разных уровнях мощности, переходные процессы, связанные с изменением нагрузки, режимы останова для перегрузки ядерного топлива и ремонта оборудования, пуски из различных состояний, испытаний систем и оборудования, предусмотренных проектом. Кроме того, оборудование реакторной установки рассчитано на режимы, протекающие с нарушением нормальной эксплуатации, включая проектные аварии, которые возникают в результате отказов оборудования, внешних воздействий и т.д.

Корпус реактора закрепляется так, чтобы исключить возможность его смещения или воздействия на другие строительные конструкции при разрыве ГЦТ полным сечением и при сейсмических воздействиях, а также при падении самолета и воздействии воздушной ударной волны [1].

При проектировании строительных конструкций, на которые передается нагрузка от опор корпуса реактора, в качестве проектной аварии рассматривается мгновенный поперечный разрыв главного циркуляционного трубопровода полным сечением в зоне сварного соединения с патрубком корпуса реактора со свободным истечением теплоносителя из реактора и трубопровода.

Разработка велась в направлении модернизации реактора, оборудования и систем максимальным учетом опыта проектирования, изготовления и эксплуатации прототипа с целью:

- повышения ядерной безопасности РУ;
- улучшения нейтронно-физических характеристик активной зоны;
- улучшения эксплуатационных характеристик РУ;

- обеспечения безопасности РУ в расширенном по сравнению с РУ В-320 секторе аварийных режимов, в том числе запроектных, включая режимы ATWS.

Топливом является слабообогащенная двуокись урана. Нагреваемый при прохождении через активную зону реактора теплоноситель первого контура поступает в парогенераторы, где отдает свое тепло через стенки трубной системы воде второго контура.

Реактор сохраняет возможность:

- нормального функционирования без остановки при землетрясении интенсивностью меньшей или равной ПЗ;
- безопасной остановки и последующей выгрузки топлива при землетрясении интенсивностью, превышающей ПЗ вплоть до МРЗ, а также при проектных авариях. Назначенный срок службы реактора – 60 лет.

Реактор представляет собой вертикальный сосуд высокого давления (корпус реактора с крышкой), внутри которого размещаются ВКУ (шахта внутрикорпусная, выгородка, БЗТ), активная зона, органы регулирования и датчики СВРК.

В состав реактора входят:

- корпус реактора;
- кольцо опорное;
- кольцо упорное;
- детали уплотнения главного разъема;
- шахта внутрикорпусная;
- выгородка;
- БЗТ;
- блок верхний;
- привод СУЗ ШЭМ-3;
- БЭР;

- активная зона;
- СВРД;
- устройство контроля протечек главного разъема;
- образцы-свидетели;
- устройство прижимное.

Управление реактивностью производится путем использования двух независимых принципов:

- механическое перемещение ПС СУЗ в активной зоне;
- изменение концентрации бора в теплоносителе.

Движение ПС СУЗ со скоростью 0,02 м/с в режиме регулирования обеспечивает выполнение проектного требования по скорости введения реактивности при нормальной эксплуатации.

Аварийная защита переводит реактор в подкритическое состояние с любого уровня мощности при любом исходном регламентном положении ПС СУЗ и поддерживает подкритичность при любых авариях, связанных с увеличением реактивности.

Падение ПС СУЗ по сигналам аварийной защиты за время не более 4 с обеспечивает выполнение нормативного требования о введении отрицательной реактивности, достаточной для предотвращения возможного повреждения ТВЭЛов сверх допустимых пределов.

В процессе работы реактора с помощью СВРД осуществляется контроль за температурой теплоносителя на входе и выходе ТВС и за распределением энерговыделения по объёму активной зоны. В необходимых случаях, путем перемещения ПС СУЗ и изменения концентрации борной кислоты в теплоносителе производится регулирование распределения энерговыделения (поддержание офсета) и связанных с ним других параметров в допустимых эксплуатационных пределах [2].

После останова реактора система борного регулирования компенсирует изменение реактивности, связанное с распадом ксенона и расхолаживанием

теплоносителя до холодного состояния, а также обеспечивает требуемую подкритичность при перегрузках топлива.

Система борного регулирования также позволяет независимо от ПС СУЗ компенсировать медленные изменения реактивности, связанные с выгоранием топлива, а также осуществлять изменения уровня мощности реактора.

Таблица 1 – Основные характеристики реакторной установки ВВЭР-1200

| Характеристика                                                                                                | Значение |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| Установленная номинальная мощность энергоблока, МВт                                                           | 1200     |
| Номинальная тепловая мощность реакторной установки, МВт                                                       | 3212     |
| Номинальная тепловая мощность реактора, МВт                                                                   | 3200     |
| Давление теплоносителя первого контура, Мпа                                                                   | 17,6     |
| Давление пара в парогенераторах, Мпа                                                                          | 7,0      |
| Температура теплоносителя на входе в реактор при работе на номинальной мощности, °С                           | 298,6    |
| Температура теплоносителя на выходе из реактора и циркуляционные петли при работе на номинальной мощности, °С | 329,7    |
| Срок службы АЭС, лет                                                                                          | 50       |
| Срок службы основного оборудования реакторной установки, лет                                                  | 60       |
| Срок службы заменяемого оборудования реакторной установки, лет (не менее)                                     | 30       |
| Коэффициент использования установленной мощности, %                                                           | До 90    |
| Коэффициент технического использования мощности, %                                                            | До 92    |
| Коэффициент готовности оборудования реакторной установки, %                                                   | 99       |
| Коэффициент полезного действия, %                                                                             | 35,7     |
| Продолжительность топливного цикла, лет                                                                       | 4-5      |
| Периодичность перегрузок, мес.                                                                                | 12-18    |
| Максимальное выгорание по тепловыделяющей сборке, МВт·сут/кг урана                                            | До 60-70 |

Продолжение таблицы 1

|                                                                                     |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Продолжительность периода между ремонтами, лет                                      | 4-8       |
| Допустимая расчетная температура на прочность, °С                                   | 350       |
| Допустимое давление при гидравлических испытаниях, МПа;<br>кг · с/см <sup>2</sup> . | 25<br>250 |
| Температура плавления оболочки ТВЭЛ, °С                                             | 1860      |

### 1.1 Активная зона

Активная зона реактора состоит из 163 тепловыделяющих сборок, часть из которых (121) содержит органы регулирования. Основные нейтронно-физические характеристики активной зоны ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200 в сравнении приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Характеристика активной зоны

| Характеристика                                                                        | Значение для реактора |          |
|---------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|----------|
|                                                                                       | В-320                 | АЭС-2006 |
| Количество тепловыделяющих сборок, загружаемых при перегрузке                         | 42                    | 42       |
| Масса двуокиси урана в тепловыделяющей сборке, кг                                     | 494                   | 533      |
| Среднее обогащение топлива подпитки по U235, мас. %                                   | 4,26                  | 4,79     |
| Длительность топливной загрузки при работе на номинальной мощности, эффективных суток | 292,9                 | 342,5    |
| Выгорание выгружаемого топлива по всем тепловыделяющим сборкам, МВт·сут/кг урана:     |                       |          |
| – Среднее                                                                             | 48,4                  | 55,5     |
| – Максимальное                                                                        | 51,5                  | 59,1     |

Продолжение таблицы 2

|                                                                                                       |      |      |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|------|
| Максимальная в ходе работы топливной загрузки относительная мощность тепловыделяющей сборки ( $K_q$ ) | 1,31 | 1,37 |
| Максимальная в ходе работы топливной загрузки относительная мощность твэла ( $K_r$ )                  | 1,46 | 1,52 |
| Максимальная линейная мощность твэла ( $Q_1$ ), Вт/см                                                 | 288  | 299  |
| Температура повторной критичности,                                                                    | 190  | 91   |
| Минимальный коэффициент запаса до кризиса на теплоотдачи                                              | 1,3  | 1,38 |
| Недогрев до температуры насыщения на входе из максимально загруженной тепловыделяющей сборки          | 8    | 3    |

## 1.2 Тепловыделяющая сборка

Тепловыделяющие сборки ТВС-2 и ТВС-2М являются усовершенствованным вариантом предшествующих бесчехловых ТВС (ТВС-М, УТВС), по сравнению с которыми в них не добавлено ни одного нового элемента. Все новые качества получены путем применения положительно зарекомендовавших себя в эксплуатации решений, усовершенствования конструкции отдельных составляющих элементов.

Конструкция ТВС-2М проста, надежна, технологична, что подтверждено опытом изготовления и эксплуатации ее на АЭС, отличается высокой геометрической стабильностью и качеством конструкторско-технологических решений.

Общий вид конструкции ТВС реактора типа ВВЭР-1000 приведен на рисунке 1. Основную часть ТВС составляет пучок твэлов (рис.2), которые находятся на расстоянии 3.65 мм друг от друга (шаг размещения твэлов

12,75 мм). Минимально допустимый зазор для прохода воды между соседними твэлами составляет не менее 0,8 мм исходя из условий охлаждения их оболочек. В пучке содержится 312 твэлов, 18 трубчатых направляющих каналов (НК) для поглощающих стержней (ПС) системы управления и защиты, центральная трубка, 15 дистанционирующих решеток с ободами, нижняя опорная решетка и головка ТВС.

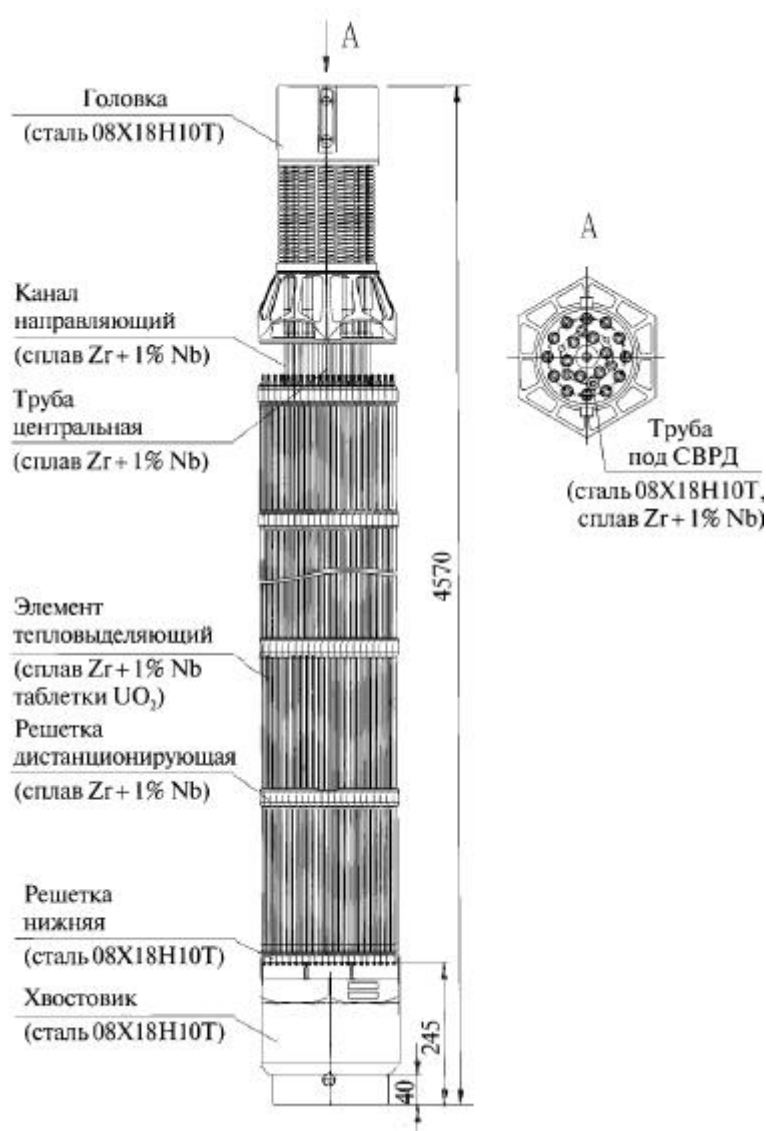


Рисунок 1 – Конструкция ТВС в ВВЭР -1000

Масса ТВС — 756 кг, а объем ее конструкций — 80 л.

Габаритные размеры ТВС:

- длина 4570 + 1 мм;

- размер пучка между противоположными гранями («под ключ») по наружной поверхности ободов — 234 мм;
- габаритный объем 170 л;
- диаметр посадочной части хвостовика — 195 мм, высота посадочной части — 50 мм;
- наружный диаметр подвижной части головки ТВС — 185 мм.

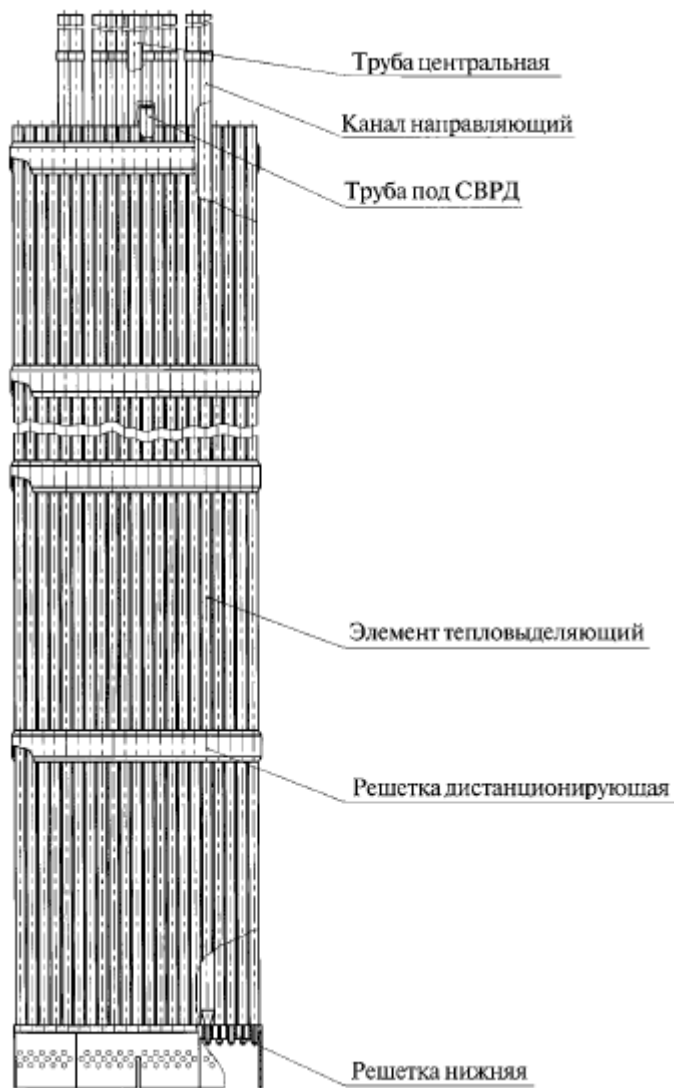


Рисунок 2 – Пучок ТВЭЛов

Естественная радиоактивность одной свежей ТВС составляет 0,5 Ки, гамма-излучение на поверхности — около 20 мЗв/ч .

Для ядерного топлива в ТВС уже существуют ограничения по ядерной безопасности — три ТВС с обогащением топлива 4.4% (без органа

регулирования СУЗ или СВП) в чистой воде при компактном расположении создают минимальную критическую массу.

По заводской терминологии, ТВС вместе с поглощающими стержнями (ПС) СУЗ или со стержнями выгорающего поглотителя называются кассетами.

Теплогидравлические характеристики одной ТВС следующие:

- средняя номинальная мощность — 18,4 МВт;
- максимально допустимая мощность — 27 МВт;
- средний подогрев воды в кассете — 33 °С;
- номинальный расход воды —  $515 \pm 50 \text{ м}^3/\text{ч}$ ;
- средняя номинальная скорость воды между ТВЭЛами — 5,6 м/с;
- гидравлическое сопротивление единичной ТВС при номинальных условиях  $2 \text{ кг/см}^2$ , а всей активной зоны равна  $1,7 \text{ кг/см}^2$ ;
- гидравлическая сила выталкивания ТВС в номинальных условиях – 450 кгс.

Конструкция новых ТВС, в том числе ТВС-2 и ТВС-2М, обеспечивает увеличение загрузки топлива в сборку (табл.1), приспособлена к любым усовершенствованиям, а также применима для внедряемых или планируемых топливных циклов. В ТВС-2М увеличена длина топливного столба с 3530 до 3730мм ( $\Delta l = 200\text{мм}$ ) и, соответственно, увеличение топливной загрузки достигнуто за счет укорачивания головки и хвостовика ТВС.

Конструкция ТВС-2М с учетом разработанных решений по снижению ее комплексного гидросопротивления (КГС) до уровня УТВС обеспечивает теплотехническую надежность и повышение мощности реакторной установки. Понижение КГС обеспечивается за счет оптимизации геометрии ячеек дистанционирующих решеток без изменения их количества и, соответственно, с сохранением изгибной жесткости каркаса.

Снижение КГС сборки позволило разработать для установки в пучке ТВЭЛов перемешивающие решетки сотовой конструкции, позволяющие организовать как закрутку теплоносителя вокруг ТВЭЛа (тип «циклон»), так и межкассетное перемешивание теплоносителя (тип «секторная»). Внедрение

этих решеток обеспечит повышение критического теплового потока и снижение паросодержания в теплоносителе, а в конечном счете позволит повысить мощность реактора. При этом каркас ТВС не препятствует межкассетному перемешиванию теплоносителя. Внедрение перемешивающих решеток предполагается выполнить на этапе повышения мощности до 3300 МВт.

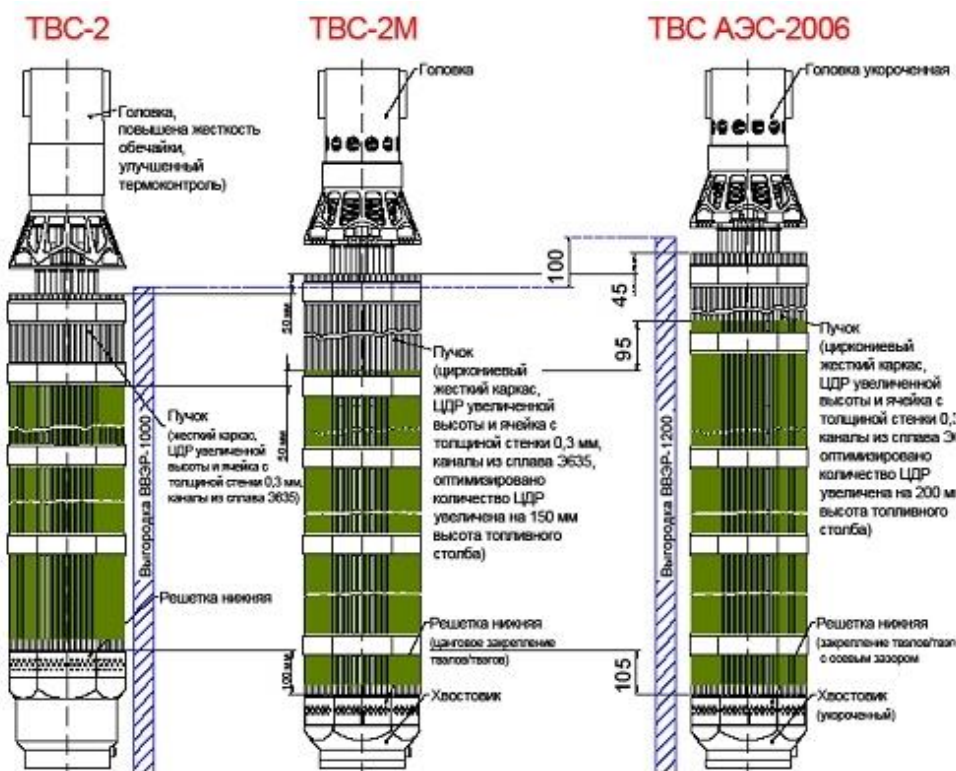


Рисунок 3 – Конструкция новых ТВС-2, ТВС-2М и ТВС АЭС-2006.

Конструкция ТВС-2М обеспечивает полную визуальную инспекцию всех периферийных ТВЭЛов, в том числе самых нагруженных угловых, а также ремонтпригодность без риска утери съемных элементов. При этом не требуются затраты на утилизацию заменяемых элементов.

Конструкция ТВС-2М, имеющая достаточное обоснование для аварийных и сейсмических нагрузок, лучше (по сравнению с УТВС) противостоит этим нагрузкам. Отсутствие лишних элементов в конструкции обеспечивает большую надежность ТВС- 2М при перегрузках топлива (на АЭС

не отмечено ни одного случая повреждения ТВС-2 и ТВС-2М). Конструкция ТВС-2М рассчитана на выполнение транспортно-технологических операций со скоростями до 4 м/мин.

Таблица 3 - Загрузка топлива в ТВС в зависимости от ее типа в реакторах ВВЭР

| Тип реактора | Тип ТВС             | Диаметр таблетки/отверстия, мм | Высота топливного столба, мм | Масса топлива в ТВЭЛе, кг | Увеличение загрузки топлива, % | Размер зерна топлива, мкм |
|--------------|---------------------|--------------------------------|------------------------------|---------------------------|--------------------------------|---------------------------|
| ВВЭР-100     | ТВС-2               | 7,57/1,4                       | 3530                         | 1,575/491,4/<br>80098     | -                              | 10                        |
|              | ТВС-2М              | 7,6/1,2                        | 3680                         | 1,671/521,3/<br>84873     | 6,1                            | 10                        |
|              | ТВС-2М              | 7,8/0,0                        | 3680                         | 1,805/563,1/<br>91793     |                                | 20...30                   |
| ВВЭР-1200    | ТВС-1200,<br>1 этап | 7,6/1,2                        | 3730                         | 1,694/528,4/<br>86128     | 7,5                            | 10                        |
|              | ТВС-1200,<br>2 этап | 7,8/0,0                        | 3730                         | 1,829/570,8/<br>93040     | 16,2                           | 20...30                   |
|              | ТВС-1200,<br>3 этап | 7,8/0,0                        | 3780                         | 1,854/578,5/<br>94287     | 17,7                           | 45...60                   |

Каркасы ТВС-2 и ТВС-2М испытаны на моделях в режиме быстрого сброса мощности, который опасен, особенно для свежих ТВС. При первой загрузке ТВС-2 на блоке Балаковской АЭС сразу после выхода на мощность сработала аварийная защита. Вся партия ТВС-2 выдержала этот режим, последующие осмотры не выявили никаких нарушений, и в итоге все ТВС отработали свой ресурс.

Поглощающий стержень СУЗ реакторной установки АЭС- 2006 и его элементы полностью повторяют (кроме длины поглощающего элемента и поглотителя) конструкцию поглощающего стержня СУЗ ВВЭР-1000.

По результатам эксплуатации ТВС-2 отмечено следующее:

- выпрямление активной зоны,
- уменьшение межкассетных зазоров до проектных величин,
- беспрецедентная надежность конструкции сборки всего один отказ за время эксплуатации 2003–2009 гг. Основные элементы ТВС-2М (головка, хвостовик, направляющий канал) признаны наиболее удачными и приняты за основу конструкции тепловыводящей сборки в АЭС-2006.

Конструкция хвостовика ТВС-2М позволяет выполнить требование технического задания на реакторную установку в части перекрытия топливного столба поглотителем при нахождении поглощающего стержня СУЗ на жестком упоре. Для этого направляющие каналы крепятся на специальной решетке, что позволяет удлинить их ниже крепления ТВЭЛов. Данное решение несколько усложняет технологию, но попутно усиливает (по прочности) конструкцию хвостовика сборки.

Для обеспечения требований технического задания по достаточности эффективности аварийной защиты и поддержания ее в этом состоянии при расхолаживании приблизительно до 100 °С и текущей концентрации бора в воде первого контура в любой момент кампании (без одного наиболее эффективного ОР СУЗ) количество приводов в активной зоне реакторной установки АЭС-2006 увеличено до 121.

### **1.3 ТВЭЛ и топливо**

Несмотря на то, что конструкция, состав и характеристики ТВЭЛа находятся в процессе постоянного совершенствования, основной базовой является модель твэла ядерного реактора ВВЭР-1000.

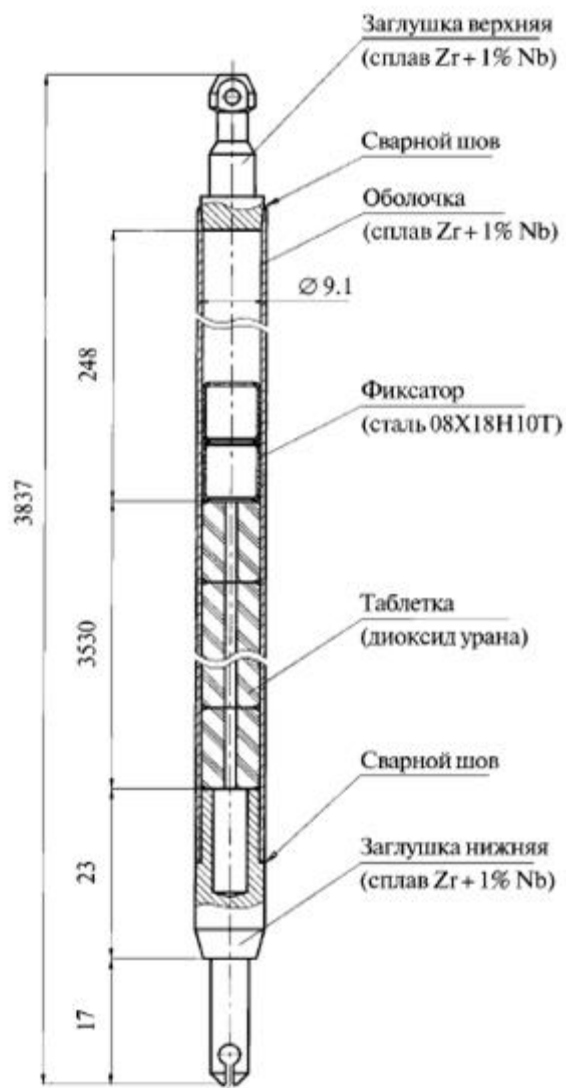


Рисунок 4 – Конструкция тепловыделяющего элемента для ВВЭР-1000.

ТВЭЛ ядерного реактора ВВЭР-1000 представляет собой трубку, заполненную таблетками из диоксида урана  $UO_2$  и герметично уплотненную концевыми деталями при помощи сварки (рис. 3 и рис.4). В эту трубку помещены таблетки диоксида урана, имеющие плотность 10,4... 10,7 г/см<sup>3</sup>, наружный диаметр 7,57-0,01 мм, высоту 20 мм, центральное отверстие диаметром 2,35+0,2 мм. Геометрические размеры твэла и топливных таблеток в ВВЭР-1000 (см. рис 5).

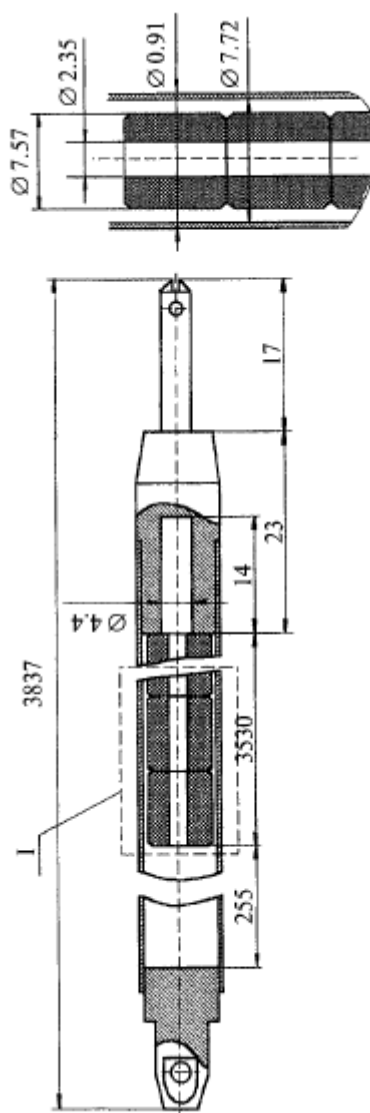


Рисунок 5 – Геометрические размеры твэла и топливных таблеток в ВВЭР-1000.

В процессе работы топливо распухает, поэтому предусматривается запас для возможности увеличения его наружу (зазор между оболочкой и таблеткой) и внутрь (отверстие в центре таблеток). Фаски делаются для снижения взаимодействия топлива с оболочкой и уменьшения скалываемости топлива при загрузке.

Общая длина столба таблеток в твэле 3530 мм. Длина трубки твэла составляет 3800 мм, поэтому положение столба топливных таблеток в твэле зафиксировано разрезными втулками из нержавеющей стали и пружиной, компенсирующей тепловые перемещения топлива. Таблетки диоксида урана

выпускаются с различным обогащением урана по изотопу урана-235. Для ВВЭР-1000 стандартные обогащения топлива следующие:

1,6 % → 2,0 % → 2,4 % → 3,0 % → 3,6 % → 4,0 % → 4,4 % → 5 %.

В реакторе ВВЭР-1200 применяется оксидное топливо, которое в то же самое время имеет некоторые существенные отличия. Максимально возможное обогащение топлива повышается до 5%, что позволяет обеспечить топливные циклы с максимальным выгоранием топлива до 70 МВт · сут/кг (урана).

В табл. 4 приведены параметры топливных таблеток и ТВЭЛов в реакторах ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200.

Таблица 4 – Параметры топливной таблетки и ТВЭЛов реакторов ВВЭР

| Параметр                           | ТВС  | ТВС-2М, ТВС-альфа | Перспектива |
|------------------------------------|------|-------------------|-------------|
| Толщина оболочки ТВЭЛов, мм        | 0,65 | 0,57              | 0,57        |
| Диаметр таблетки, мм               | 7,57 | 7,60- 7,8         | 7,8         |
| Диаметр центрального отверстия, мм | 1,4  | 1,2-0             | 0           |
| Размер зерна в топливе, мкм        | 10   | 25                | 40-45       |

Внутри твэла помещены таблетки диоксида урана с плотностью равной 10,4 –10,7 г/см<sup>3</sup>.

Новые твэлы существенно длиннее, и в них увеличен топливный столб, что позволяет повысить как снимаемую с каждого элемента мощность, так и подогрев теплоносителя в активной зоне. При изготовлении в твэлы закачивают гелий до давления 20–25 кгс/см<sup>2</sup>.

При эксплуатации РУ в процессе деления ядер U<sup>235</sup> образуются газы, так называемые газообразные продукты деления, увеличивающие давление под оболочкой до 50–80 кгс/см<sup>2</sup>. При работе на мощности средняя температура внутри топливной матрицы составляет 1500–1600 °С, на наружной поверхности оболочки твэла около 470 °С [3].

ТВС реактора ВВЭР-1200 обеспечивает современные уровни надежности, безопасности и экономичности. Надежность обеспечивается выполнением таких требований как:

- использование лучших апробированных технических решений с учетом эволюционного подхода к модернизации;
- применение технических решений, обеспечивающие максимальную унификацию и преемственность к разработанным ТВС;
- обеспечение разборки конструкции ТВС с возможностью замены дефектных ТВЭЛОВ;
- работоспособность при высоких выгораниях;
- работоспособность при повышенных параметрах теплоносителя.

Безопасность активной зоны обеспечивается:

- высокой надежностью конструкции и ее элементов;
- высокой геометрической стабильностью элементов конструкции;
- качеством конструкторских решений, связанных с выполнением функций аварийного останова реактора и исключением чрезмерных реактивностных эффектов, приводящих к нарушениям проектных критериев.

Экономические показатели определяются выполнением следующих требований к ТВС:

- обеспечения максимально возможной загрузки в них топлива для достижения высоких значений коэффициента используемой установленной мощности, что достигается удлинением топливного столба, уменьшением центрального отверстия, возможно до нуля, небольшим увеличением диаметра топливной таблетки;
- максимально возможного обогащения топлива (в перспективе до 6%);
- обеспечения топливных циклов с максимальным выгоранием топлива до 70 МВт · сут/кг.

Дальнейшее развитие технологии ТВС-2М направлено на повышение ураноемкости, теплотехнической и эксплуатационной надежности.

## **Глава 2 Проблемы выбора материалов и обоснование конструкции ТВЭЛОВ**

ТВЭЛ является главным элементом активной зоны. Линейное тепловыделение которого достигает 550 Вт/см, а объемное энерговыделение в сердечнике до 2500 Вт/см<sup>3</sup>. Это приводит к высоким температурам и градиентам температур в конструкции, достигающим в случае оксидного топлива 500 град/мм [4].

Тепловыделяющие элементы эксплуатируются в не простых условиях, оказывающего на него воздействия радиационного излучения, высоких температур, механических напряжений и коррозионных сред. Выбор безопасного и надежного конструктивного решения, удовлетворяющего изначальным требованиям, условиям и длительной эксплуатации проводится на этапе проектирования. Проектирование включает в себя поиск лучшего варианта конструкции, выбор материалов, обоснование работоспособности, ресурса и разработку принципиальной схемы технологии изготовления твэла и тепловыделяющей сборки (ТВС). Разработка оптимальной конструкции проводится из условий требуемой надежности, экономичности, минимальной материалоемкости и технологичности [5].

### **2.1 Условия эксплуатации и требования к твэлам**

С учетом сложных условий работы твэлов ядерных реакторов требования к ним представляются трудновыполнимыми. Конструкция твэл состоит из герметичной оболочки, внутри которой размещается ядерное топливо в виде спеченных таблеток с осевым отверстием, где конструктивно заложена возможность локализации радиоактивных продуктов деления. Оболочка обеспечивает требуемую механическую прочность конструкции, ее размерную стабильность, а также защищает ядерное топливо от коррозионно-эрозионного воздействия теплоносителя. Герметизация оболочки

осуществляется приваркой по торцам концевых деталей. Под оболочкой твэла для компенсации давления газообразных продуктов деления предусмотрен свободный объем, а также размещены пружинные элементы для фиксации топливного столба, гетеры и т.д.

Твэл считается работоспособным, если он в течение эксплуатации был герметичен, а его геометрические размеры и форма не изменились настолько, чтобы заметным образом ухудшилось внешнее охлаждение и объемное распределение температур в активной зоне. Выход твэла из строя приводит к тяжелым последствиям, загрязнению теплоносителя ядерным топливом и радиоактивными продуктами деления. Наиважнейшей задачей усовершенствующих твэлов является обеспечение надежности и безопасности. В современных энергетических реакторах вероятность разгерметизации твэла должна быть меньше  $(1 - 2) \cdot 10^{-5}$ .

Накопление продуктов деления, т.е. непрерывное легирование топлива и радиационные повреждения нейтронами и осколками деления изменяет его физико-механические и теплофизические свойства, приводит к изменению размеров и объема за счет процессов распухания, радиационного уплотнения или радиационного роста. Объемные изменения определяют напряжения в оболочке при ее силовом взаимодействии с топливом [6].

Высокие температуры и градиенты температур, достигающие 500 °C на миллиметр, приводят к изменению структуры топлива, вследствие массопереноса и рекристаллизации. Это, в свою очередь, вызывает изменение распределения температуры в сердечнике.

В реакторах, охлаждаемых водой, на оболочку действует внешнее давление теплоносителя. В этом случае возможна потеря устойчивости оболочки. Газовыделение (выделение ГПД) может поспособствовать увеличению давления под оболочкой и может быть причиной повреждения твэлов.

Немаловажным фактором, ограничивающим работоспособность твэлов, является коррозия и абразивный износ со стороны теплоносителя, а коррозия в местах контакта оболочки и дистанционирующих решеток. Коррозионное растрескивание оболочки под действием растягивающих напряжений могут вызывать такие продукты деления как, например йод, цезий, теллур и др. Топливо и оболочка в процессе эксплуатации подвержены действию термических напряжений от теплового потока, термомеханических напряжений из-за различия температур и коэффициентов термического расширения.

Под действием нейтронного облучения происходит изменение размеров оболочек за счет распухания или радиационного роста. Эти процессы во многом определяют напряженно-деформированное состояние. Высокие скорости теплоносителя вызывают вибрации твэлов и циклическое изменение напряжений в оболочке, что может привести к циклической усталости и разрушению.

При высоких дозах облучения значительно изменяются механические свойства оболочки. Увеличивается предел текучести, снижается пластичность. Под действием облучения оболочки из нержавеющей сталей становятся хрупкими, пластические деформации при разрушении падают практически до нуля. В области относительно низких температур, при которых без облучения скорость ползучести близка нулю, деформации контролируются радиационной ползучестью.

Стоит рассмотреть факторы, обусловленные объединением твэлов в ТВС, такие, как установочные силы, изгиб и взаимодействие твэлов друг с другом через дистанционирующие элементы.

Степень изменений, происходящих в твэлах под влиянием перечисленных факторов, зависит от интенсивности и длительности реакторного облучения, температуры облучения, от исходной структуры и свойств материалов, от конструктивного оформления твэлов и т.д. В процессе эксплуатации происходит не только изменение геометрии и формы твэлов, но и накопление повреждений в оболочке, приводящих к ее разрушению.

С учетом сложных условий работы требования к ТВЭлам вытекают из самого назначения ТВЭлов и заключаются в выполнении следующих условий:

- оптимальное содержание делящихся и воспроизводящих материалов, необходимое для обеспечения критичности активной зоны в течение всей компании;
- минимальное содержание материалов, поглощающих нейтроны;
- герметичность, минимальные изменения формы и размеров в процессе эксплуатации;
- развитая поверхность теплопередачи;
- сохранение прочности всех элементов при эксплуатации и перегрузке;
- коррозионная и эрозионная устойчивость материалов и элементов ТВЭла, совместимость топлива с оболочкой, совместимость топлива и оболочки с теплоносителем;
- отсутствие в конструкции локальных перегревов и концентраторов напряжений;
- надежность при проектных выгораниях;
- простота и низкая стоимость изготовления, возможность автоматизированного массового производства;
- безопасность и простота регенерации отработанных ТВЭлов.

Эти требования должны выполняться не только при нормальной эксплуатации, но и в аварийных ситуациях, что подчас более важно для надежного обеспечения безопасности.

## **2.2 Требования к материалам тепловыделяющих элементов**

К материалам топлива и оболочек тепловыделяющих элементов предъявляются различные требования. Требования к топливу являются:

- высокая температура плавления, отсутствие фазовых переходов в области рабочих температур;

- высокое содержание делящихся и воспроизводящих материалов;
- радиационная стойкость, достаточная размерная стабильность;
- совместимость с материалами оболочки и теплоносителя;
- высокая теплопроводность;
- малое сопротивление пластическому деформированию;
- низкая стоимость и экономичность технологии производства;
- низкий коэффициент термического расширения;
- простота регенерации топлива.

Двуокись урана имеет температуру плавления около 2800 °С до 2900 °С, при этом она не взаимодействует с водой и паром даже при высоких температурах, совместима с материалом оболочки ТВЭЛа. Диоксид урана – это керамический материал, поэтому он имеет очень низкую теплопроводность, сравнимую с огнеупорными материалами.

Плотность диоксида урана варьирует в пределах от 9,4 г/см<sup>3</sup> до 10,8 г/см<sup>3</sup>, и зависит от технологии уплотнения и спекания. В топливе реакторов ВВЭР диоксид обычно имеет плотность 10,4 г/см<sup>3</sup> до 10,7 г/см<sup>3</sup>. Матрица диоксида урана является достаточно жесткой и позволяет удерживать 95% – 98% радиоактивных продуктов деления, которых к концу кампании топлива накапливается примерно 600 Ки на килограмм топлива.

Требования к оболочке определяются ее функциональным назначением: герметичная изоляция сердечника и обеспечение механической прочности твэла. Отметим наиболее общие требования к материалам оболочки:

- малое сечение поглощения нейтронов;
- достаточная прочность и пластичность при рабочих условиях;
- совместимость с теплоносителем, материалом сердечника и продуктами деления;
- высокая рабочая температура;
- отсутствие фазовых переходов при рабочих температурах;

- радиационная стойкость, минимальные изменения размеров в процессе эксплуатации;
- высокая теплопроводность;
- согласованный с материалом сердечника коэффициент термического расширения;
- низкая стоимость, экономичность и стабильность технологии производства.

В качестве материалов оболочек в реакторах на тепловых нейтронах используются сплавы циркония, легированного 1%-ным ниобием. Их применение обусловлено, прежде всего, низким сечением поглощения нейтронов.

Цирконий (по сравнению, например, с нержавеющей сталью) слабо поглощает тепловые нейтроны реактора, но в то же время обладает достаточной прочностью. Цирконий коррозионно-стойк в воде и водных растворах борной кислоты, применяемых в ядерных реакторах, и достаточно технологичен. Присадка ниобия используется для повышения пластичности циркония. Сплав циркония с 1% ниобия (это сплав E-110) имеет плотность 6,55 гр/см<sup>3</sup>, его температура плавления составляет 1860 °С.

Изучение свойств этого сплава было выявлено, что температура 350 °С является критической точкой, после которой прочностные свойства сплава ухудшаются, а пластические увеличиваются. В интервале температур 400 – 500 °С свойства сплава резко изменяются. Цирконий химически взаимодействует с водой в реакции окисления, освобождая газообразный водород, образующий взрывоопасную, «гремучую» смесь с кислородом:  $Zr + 2H_2O \rightarrow ZrO_2 + 2H_2 + Q_{\text{реак}}$ . Однако при невысоких температурах 0 до 300°С интенсивность этой реакции чрезвычайно мала. А вот при температуре выше 1000 °С цирконий интенсивно взаимодействует уже с водяным паром. При 1200 °С и выше эта реакция протекает очень быстро и интенсивно (минуты), при этом выделяется энергия, которая может разогреть оболочку до

температуры плавления  $1860\text{ }^{\circ}\text{C}$  от поверхности в глубь толщины трубки, при этом образуется много взрывоопасного водорода. Таким образом, пароциркониевая реакция при высоких температурах является опасной с точки зрения разгерметизации твэла и выброса водорода, что подтверждает опыт такой тяжелой аварии, как чернобыльская.

Наружный диаметр трубки твэла равен  $9,1\text{ мм} \pm 0,05\text{ мм}$ , ее толщина составляет  $0,65\text{ мм} \pm 0,03\text{ мм}$ , где внутренний диаметр  $7,72\text{ мм} \pm 0,08\text{ мм}$ . При герметизации концевых пробок твэла его внутренняя полость заполняется гелием до давления  $20\text{ кгс/см}^2$  до  $25\text{ кгс/см}^2$ . Гелий является очень хорошим газовым теплоносителем, и во время работы ТВЭЛа он передает тепло от урановых таблеток к оболочке. В то же время гелий удобен для контроля за герметичностью твэла, поскольку он очень текуч и технология специальных приборов-течеискателей позволяет обнаружить течь гелия. Герметичность каждого твэла при изготовлении проверяется гелиевым течеискателем в связи с высокими требованиями к герметичности. Негерметичные твэлы отбраковываются.

Внутренний объем твэла в холодном состоянии составляет  $181\text{ см}^3$ , он на 70 % заполнен таблетками топлива, а 30 % занимают газы. Общая длина твэла составляет 3837 мм, общая масса равно 2,1 кг. На его нижней концевой пробке имеется поперечное отверстие для крепления к нижней опорной решетке тепловыделяющей сборки (называется также «ласточкин хвост»).

При протекании цепной реакции деления урана на мощности по объему топливной таблетки равномерно выделяется тепловая энергия с интенсивностью до  $450\text{ Вт на }1\text{ см}^3$  ( $450\text{ кВт/л}$ ). Эта энергия передается из объема таблетки к поверхности ТВЭЛа теплопроводностью, поэтому максимальная температура будет в центре таблеток. При номинальной мощности реактора средняя температура в центре топливных таблеток равна около  $1500^{\circ}\text{C} - 1600^{\circ}\text{C}$ , а на поверхности этих таблеток около  $470^{\circ}\text{C}$ , что обеспечивает очень большой перепад температур порядка  $1200^{\circ}\text{C}$  при радиусе

ТВЭЛа всего 3,8 мм. Максимальная температура в центре таблетки  $UO_2$  и на ее поверхности достигает 1940 и 900 °С соответственно. При работе топлива с номинальной мощностью, перепад температуры на газовом зазоре между таблетками и оболочкой в среднем составляет 100 °С, а по толщине самой трубки примерно 23 °С. Температура наружной поверхности трубки ТВЭЛа при этом составляет около 350 °С. Удельный тепловой поток через эту поверхность в среднем составляет около 0,6 мВт/м<sup>2</sup>, а линейный — 17 мВт/м<sup>2</sup> трубки. Топливный сердечник ТВЭЛа при работе на мощности удлиняется от нагрева примерно на 30 мм.

Однако наибольшие изменения происходят с топливом по мере его выгорания. Содержание делящегося материала  $U^{235}$  в массе топливных таблеток (в равновесном топливном цикле) снижается от 4,4 % в начале работы примерно 0,6 % – 0,8% перед выгрузкой из реактора через 3 – 4 года работы.

При этом сама таблетка распухает, деформируется и растрескивается, причем растрескивание может быть как радиальным, так и кольцевым. Любой тип растрескивания топлива снижает теплопроводность, но особенно заметно это происходит при кольцевых трещинах. При распухании топливо может вступать в прямой контакт с оболочкой, что также нежелательно. Изменяется и температура плавления топлива (см. рис. 7)

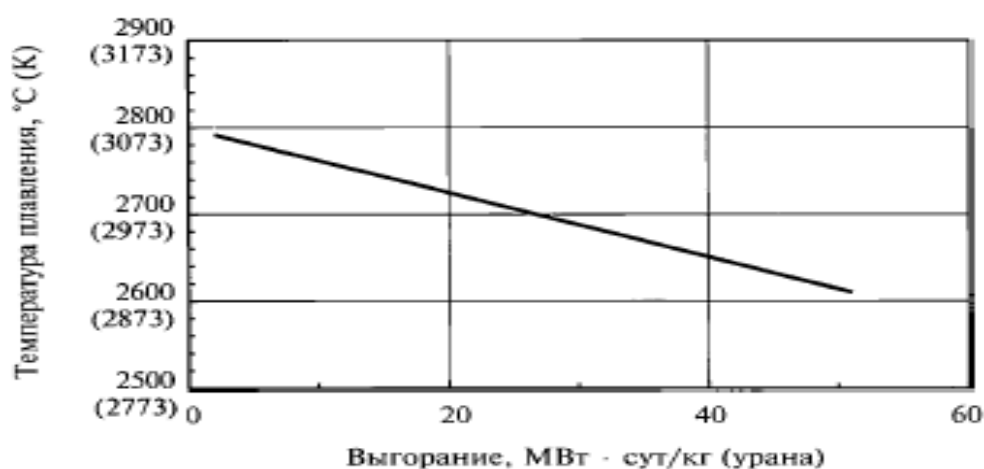


Рисунок 7 – Изменение температуры плавления топлива

Около 5 % осколков деления урана представляют собой газообразные вещества, которые в конце кампании увеличивают давление газов под оболочкой ТВЭЛА на 80 атм. в горячем рабочем состоянии. После охлаждения топлива парциальное давление этих газообразных осколков деления в оболочке ТВЭЛА составляет около 50 атм.

В последние 10 – 15 лет непрерывно ведутся разработки и опытная эксплуатация усовершенствованного топлива. Цели всех усовершенствований заключаются в том, чтобы повысить глубину выгорания топлива, сохранив плотность и герметичность ТВЭЛА, а также в определенных пределах геометрию ТВЭЛА и ТВС. В усовершенствованном топливе диаметры центрального отверстия были уменьшены с 2,4 мм до 1,5 мм (а в некоторых до 1,2 мм с тенденцией дальнейшего уменьшения до нуля), что позволит увеличить топливную загрузку реактора, хотя при этом несколько повышается температура в центре таблетки. Для этой же цели, а также для снижения утечки нейтронов в торцевом направлении пока только в экспериментальном топливе в торцы ТВЭЛА добавляют таблетки обедненного урана, что позволяет увеличить топливную загрузку одной ТВС на 21 кг урана и довести ее до 515,4 кг.

Широко применяется так называемое уран-гадолиниевое топливо (УГТ). При этом в стандартный оксид урана примешивают до 5 % весовых частей оксида гадолиния ( $Gd^{203}$ ), который является сильным выгорающим поглотителем. ТВЭЛЫ с таким наполнением называют тепловыводящими элементами с гадолинием (ТВЭГ). Введение выгорающего поглотителя позволяет снизить избыточную реактивность свежего топлива подпитки (4,4 % и 5,0%) и пусковую концентрацию борной кислоты, повышая тем самым безопасность эксплуатации.

В последние годы после ряда исследований обогащение топлива подпитки было повышено до 5 %. Такое топливо уже работает на блоках ВВЭР. По имеющимся данным, после реакторных исследований в ТВЭЛАХ, достигших глубины выгорания примерно 50 – 55 МВт · сут/кг (урана), оксидная пленка на

оболочке не превышает безопасных пределов, выделение газообразных продуктов деления составляет порядка 3 % .

Таким образом, условия работы оболочки даже при таких выгораниях топлива являются удовлетворительными. То есть ТВЭЛы имеют существенные резервы, чтобы достичь планируемых глубин выгорания порядка 60 – 65 МВт · сут/кг (урана).

### 2.3 Обоснование работоспособности твэлов

Работоспособность конструкции твэла может быть аргументирована расчетными или экспериментальными методами. Экспериментальные методы требуют массового облучения твэлов, значительных временных и материальных затрат. Важнейшей задачей при планировке испытаний на надежность является выбор объема испытаний, который характеризуется двумя величинами: количеством испытываемых твэлов  $n$  и продолжительностью испытаний  $t_n$ .

План испытания на надежность изделий в реакторостроении называется планом  $[N, B, T]$ . Он состоит в испытании  $n = N$  образцов в течение времени  $t_n = T$  без замены отказавших образцов новыми в процессе испытаний. Требуется подтвердить, что вероятность безотказной работы изделия в течение требуемого времени  $t_k$  (время кампании) будет удовлетворять условию:  $P(t_k) \geq P_{\text{доп}}$  с доверительной вероятностью  $\alpha$ . Это означает, что в  $100\alpha$  случаев доля изделий, проработавших период  $t_k$  безотказно должна быть меньше  $P_{\text{доп}}$  или доля отказавших — не больше  $1 - P_{\text{доп}}$ . Для решения задачи необходимо знать тип закона надежности  $P(t)$ . В случае экспоненциального закона надежности объем испытаний определяется из уравнения:

$$n \cdot t_n = K_m \cdot t_k ,$$

где  $K_m$  — коэффициент, зависящий от  $m$  количества отказавших изделий из общего количества  $n$  за время  $t_n$ , доверительной вероятности  $\alpha$  и допустимого

значения  $P_{\text{доп}}$ .

Особую важность приобретают расчетные методы обоснования работоспособности твэлов, базирующиеся на математических моделях их поведения и верификации моделей на доступном экспериментальном материале.

В основу разработки конструкции твэлов, а также определения допустимых эксплуатационных характеристик и ресурса их работы заложены принципы оценки коэффициентов запаса по следующим критериям:

- по температуре плавления топлива, оболочки, дистанционирующих элементов при всех условиях эксплуатации и при максимальной проектной аварии (МПА);
- по температуре начала физико-химического или металлургического взаимодействия между топливом и оболочкой, теплоносителем и оболочкой, топливом и теплоносителем;
- по комплексу факторов, приводящих к кризису теплосъема (для реакторов с водяным охлаждением);
- по критическому давлению потери устойчивости оболочки, включая потерю устойчивости вследствие ползучести;
- по напряжениям коррозионного растрескивания и глубине прорастания трещин в оболочке в условиях агрессивной среды, содержащей продукты делений.

Правильный подход к решению вопросов эксплуатационной надежности конструкции твэла позволяет оптимально сочетать требуемую безопасность и высокие экономические показатели работы реакторной установки. Чрезмерный консерватизм в выборе допускаемых запасов, с одной стороны, приводит к повышению стоимости производства твэлов и возрастанию доли топливной составляющей в общей стоимости электроэнергии. С другой стороны, недостаточная обоснованность тех или иных конструкторских и технологических решений и допустимых эксплуатационных параметров твэлов

может привести к их разрушению, к снижению безопасности реакторной установки, а в отдельных случаях к аварийным ситуациям с большим экономическим ущербом [9].

В зависимости от конкретных условий работы твэла математическое описание его поведения может быть различным. В общем случае напряженно-деформированное состояние твэла может быть описано системой интегро-дифференциальных уравнений, состоящих из дифференциальных уравнений равновесия, зависимостей Коши и уравнений механического состояния, связывающих компоненты напряжений и деформаций. Кроме уравнений, описывающих напряжения и деформации в твэлах модель поведения включает распределение температур, закономерности изменения объема материалов при облучении, изменения структуры, выхода ГПД и др. Решение должно удовлетворять начальным условиям и граничным условиям в любой момент времени. В качестве математических методов решения используют методы последовательных приближений, конечных разностей и конечных элементов.

## **2.4 Эксплуатационные свойства оксидного топлива**

В настоящее время основным видом топлива в энергетических реакторах, является диоксид урана. Топливо для реактора типа ВВЭР представляет собой пучок твэлов с оболочками из циркониевого сплава и заключенными в них таблетками диоксида урана. С целью улучшения физических характеристик и повышения безопасности в ряде твэлов используются таблетки, содержащие также оксид гадолиния. Достоинством оксидного топлива считается его повышенная по сравнению с металлическим топливом температура плавления  $T_{пл} = 2880\text{ }^{\circ}\text{C}$

### 2.4.1 Физические, теплофизические и механические свойства

Диоксид урана представляет собой материал темно-коричневого цвета (коричневая соль). Он имеет гранецентрированную кубическую кристаллическую структуру, в которой ионы урана занимают углы и грани решетки, а ионы кислорода находятся в центре. Диоксид урана является полупроводником. Его электропроводность зависит от способа получения и количества микропримесей. Важнейшим свойством  $\text{UO}_2$  является способность изделий, изготовленных из него, не менять свою форму при облучении. Прессованный  $\text{UO}_2$  обладает достаточно высокой механической прочностью (на изгиб  $\approx 1 \text{ т/см}^2$ , на сжатие  $\approx 10 \text{ т/см}^2$ ). В то же время чистый диоксид урана неустойчив к циклическим тепловым нагрузкам.

Диоксид урана является довольно инертным оксидом, у которого ярко выражены восстановительные свойства.

Важными теплофизическими свойствами  $\text{UO}_2$  являются термическое расширение, теплоемкость и теплопроводность. Эти свойства определяют рабочие характеристики ТВЭЛов. Коэффициент линейного термического расширения  $\alpha$  увеличивается с ростом температуры. Температурная зависимость теплоемкости  $\text{UO}_2$  при постоянном давлении  $C_p$ , построенная по отобранному относительно надежным данным.

Интегральное значение  $C_p \cdot dt$ , характеризующее энтальпию (или скрытую теплоту), равно количеству тепла, запасенному  $\text{UO}_2$  в ТВЭЛах.

Для данной термической обработки и технологического процесса коэффициент теплопроводности  $k$  оксидного топлива имеет следующую общую зависимость от температуры  $T$  и фактической плотности  $\rho$  (или пористости):

$$k(T, \rho) = C_1 + [T \cdot (C_2 - C_3 \cdot \rho)]^{-1}.$$

Теплопроводность увеличивается с ростом плотности, но падает с ростом температуры. Понижение теплопроводности с ростом температуры представляет собой отрицательную характеристику работоспособности

оксидного топлива в ТВЭлах ядерных реакторов.

По теплопроводности оксидного топлива имеется большое количество экспериментальных данных, поскольку этот параметр необходим для проектирования ядерных реакторов (легководных и тяжеловодных энергетических реакторов).

Радиационный рост оказывает небольшое влияние на оксидное или керамическое топливо, поскольку оно, как правило, работает при высокой температуре. Термическое циклирование обычно приводит к растрескиванию топливных таблеток из  $\text{UO}_2$ , а не к изменению их размеров.

Поэтому основными радиационными эффектами, заслуживающими рассмотрения при анализе влияния облучения на оксидные или керамические топлива, остаются радиационное распухание и радиационная ползучесть.

Оксидное или керамическое топливо испытывает меньшее радиационное распухание под действием инертных газов продуктов деления, чем металлическое топливо при той же температуре облучения [10].

Распухание топлива и внутреннее давление, развивающееся в результате выделения в ТВЭле летучих и газообразных продуктов деления, могут лимитировать работоспособность топлива и, в частности, выгорание.

При этом, необходимо учитывать, что желание эксплуатировать оксидное топливо при максимально возможной линейной мощности (для повышения теплового коэффициента полезного действия) приводит к тому, что в ТВЭлах многих конструкций температура в центре топлива близка к температуре плавления  $\text{UO}_2$ . Другими словами, при данных условиях внешнего сдерживания распухания (оболочкой) радиационное распухание зависит главным образом от выгорания и температуры топливных таблеток из  $\text{UO}_2$ .

## 2.4.2 Выход ГПД из оксидного топлива

25 % осколков деления являются атомы инертных газов, таких как: ксенон и криптон. Для  $U^{235}$  20,6 % осколков деления составляет ксенон, а 3,7 % криптон. При делении  $Pu^{239}$  доля ксенона равна 23,7 %, а криптона 1,9 %.

Выход ГПД из топливной матрицы определяет давление под оболочкой, а так же термическое сопротивление в зазоре или на контакте топливо-оболочка.

Обоснование работоспособности твэлов в стационарных и переходных условиях, предсказание поведения твэлов в аварийных режимах, оптимизация давления в твэлах – все эти вопросы непосредственно связаны с изучением и прогнозированием поведения ГПД.

Некоторые твэлы в активной зоне могут иметь дефекты оболочек, возникающие в процессе работы. Если даже в оболочке появились только микротрещины, в теплоноситель через них будут выходить продукты деления: газообразные (изотопы ксенона и криптона) и легколетучие (изотопы йода, цезия и другие). Наиболее биологически значимые радионуклиды представлены в таблице 5.

Таблица 6 – Период полураспада радионуклидов газов и йода

| Нуклид            | $T_{1/2}$ | Нуклид             | $T_{1/2}$ | Нуклид           | $T_{1/2}$             |
|-------------------|-----------|--------------------|-----------|------------------|-----------------------|
| Kr <sup>85</sup>  | 10,7 г.   | He <sup>133</sup>  | 5,2 сут.  | I <sup>129</sup> | $1,6 \cdot 10^7$ лет. |
| Kr <sup>m85</sup> | 4,5 ч.    | He <sup>m133</sup> | 2,2 сут.  | I <sup>131</sup> | 8 сут.                |
| Kr <sup>87</sup>  | 1,3 ч.    | He <sup>135</sup>  | 9,1 ч.    | I <sup>133</sup> | 21 ч.                 |
| Kr <sup>88</sup>  | 2,8 ч.    | He <sup>m135</sup> | 15,7 мин. | I <sup>135</sup> | 6,6 ч.                |

### 2.4.2.1 Поведение ГПД в оксидном топливе

Вследствие изменения структуры (облучение оксидного топлива) поведение газообразных продуктов в разных зонах различно. При изучении поведения газообразных продуктов рассматривают зону исходной структуры ( $T < 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), зону равновесных зерен ( $1200\text{ }^{\circ}\text{C} < T < 650\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) и зону столбчатых кристаллов.

Оценка структуры облученного топлива, работавшего при температурах ( $800 - 1600$ )  $^{\circ}\text{C}$ , свидетельствует о том, что образующиеся газовые продукты (ГПД) могут содержаться в топливе в виде отдельных атомов и пузырьков, расположенных как внутри зерна, так и на границах и ребрах зерен. В большинстве случаев при температуре меньше  $1700\text{ }^{\circ}\text{C}$  наблюдается равномерное распределение пузырьков внутри зерна, а при  $T < 1800\text{ }^{\circ}\text{C}$  диаметр большинства пузырьков не превышает  $(1 - 2)\text{ нм}$ . Концентрация находится в пределах  $(1 - 15) \cdot 10^{17}\text{ см}^{-3}$ .

В настоящее время нет подробной модели, описывающей подвижность пузырьков. Предполагается, что их движение контролируется объемной или поверхностной диффузией. На подвижность пузырьков влияет их форма, присутствие твердых продуктов деления и дефекты структуры топлива.

Газообразные продукты деления, выходящие к границам зерна путем объемной диффузии, образуют линзообразные пузырьки, а на ребрах трехгранные каналы. В процессе облучения эти каналы постепенно соединяются между собой и с поверхностью таблетки, обеспечивая вместе с межзеренной диффузией выход газа под оболочку ТВЭЛ.

Распределение ГПД в диоксиде урана, облученном при температуре  $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ . При дальнейшем облучении возрастает содержание газа в крупных пузырьках внутри и на границе зерен (ГПД в порах). После выгорания  $40\text{ МВт} \cdot \text{сут/кг}$  (урана) содержание газа в порах стабилизируется. Разница между генерацией ГПД и его суммарным содержанием в топливе.

#### 2.4.2.2 Выделение ГПД под оболочку твэла

Основными факторами, определяющими выделение ГПД, являются условия облучения. Анализ зависимости выделения ГПД от максимальной и средней мощности твэла, температуры в центре топливного сердечника и средней температуры показал, что с увеличением перечисленных параметров выделение газа возрастает.

Попытки сравнить данные о выделении ГПД, полученные в разных исследованиях, приводят к большому разбросу результатов. Это объясняется влиянием таких факторов, как геометрия твэла, структурные характеристики топлива, температура оболочки, неравномерность энерговыделения по высоте твэла а, история облучения. Особое внимание следует уделить последнему фактору, поскольку его нельзя описать только средними или максимальными значениями параметров (мощность, температура облучения).

Данные о влиянии глубины выгорания на выделение ГПД указывают на существование начального периода облучения, в течение которого не происходит выделение ГПД под оболочку твэла. Предполагается, что такая задержка связана с накоплением ГПД по границам зерен и последующим образованием сетки взаимосвязанных каналов, обеспечивающих выход ГПД под оболочку твэла.

Продолжительность инкубационного периода зависит от температуры топлива. При температуре ниже 1200 °С инкубационный период соответствует выгоранию 30 – 40 МВт ·сут/кг, а при температуре выше 1400 °С выгоранию порядка 10 МВт ·сут/кг, что, по-видимому, объясняется увеличением подвижности атомов газа, пузырьков и возрастанием выхода ГПД из зерна в окружающие пузырьки. Предполагается, что для насыщения границ зерна и образования стабильной взаимосвязанной сетки каналов концентрация атомов ГПД на поверхности должна составлять примерно  $(2 - 7) \cdot 10^{15} \cdot \text{см}^{-2}$ . После

достижения такой концентрации выделение ГПД возрастает с увеличением выгорания.

Для анализа поведения ГПД при быстром увеличении температуры топлива, характерном для аварийных режимов, были проведены специальные эксперименты, результаты которых полезны и для анализа поведения ГПД при работе АЭС в режиме регулируемой мощности. Испытание твэла, предварительно облученного до выгорания около 29 МВт·сут/кг, при максимальной температуре топлива около 1800 °С в реакторе в режиме быстрого всплеска мощности (подъем и снижение мощности за 8 секунд, максимальная температура топлива равно 2800 °С), вызвало увеличение выделения ГПД на 50 %- 60 %.

Для твэла, облучаемого на постоянной мощности при близких максимальных температурах выход не превышал 9 %. При исследовании микроструктуры топлива после испытаний в режимах всплеска мощности выявлено повышение концентрации пузырьков диаметром 65 нм в зонах исходной структуры и равноосных зерен, а также появления крупных пузырьков по границам зерен[11].

#### **2.4.2.3 Факторы, влияющие на выход ГПД**

Выход ГПД из оксидного топлива характеризуется сильной температурной зависимостью, которая выражается следующим образом:

Таблица 7 – Зависимость выхода ГПД от температуры

| Температура, К | Выход ГПД, % |
|----------------|--------------|
| 1300           | 0,5          |
| 1300 – 1600    | 10           |
| 1600 – 1900    | 60           |
| >1900          | 95           |

В процессе деления образуется спектр ГПД с различными периодами полураспада: от  $\text{Xe}^{137}$  с периодом полураспада  $T_{1/2} = 229,4$  до долгоживущих нуклидов  $\text{Kr}^{85}$  с  $T_{1/2} = 10,73$  года, стабильных нуклидов  $\text{Kr}^{87}$ ,  $\text{Xe}^{136}$  и др.

Кроме того, предшественниками ГПД могут быть такие легколетучие элементы, как I, Te, Br, Rb, которые имеют отличные от нейтральных газов химические свойства и, соответственно, растворимость и коэффициент диффузии в топливе.

Период полураспада, естественно, сказывается на выходе нуклида. Короткоживущие нуклиды успевают выйти только из поверхностных слоев, тогда как стабильные и долгоживущие – из всего объема зерна (или образца). Поэтому выход последних обычно преобладает.

Повышение плотности топлива снижает абсолютный выход ГПД вследствие уменьшения количества пор, в которых ГПД мигрируют значительно быстрее, чем в матрице топлива.

Образование в оксидном топливе на границах зерен взаимосвязанных каналов и туннелей, о которых говорилось выше и которые резко ускоряют выход ГПД из топлива, происходит при достижении определенного критического выгорания.

Вследствие этого можно сделать вывод, что: выход ГПД из мелкозернистого топлива в конечном итоге оказывается большим, чем из крупнозернистого (смотреть рисунок 8).

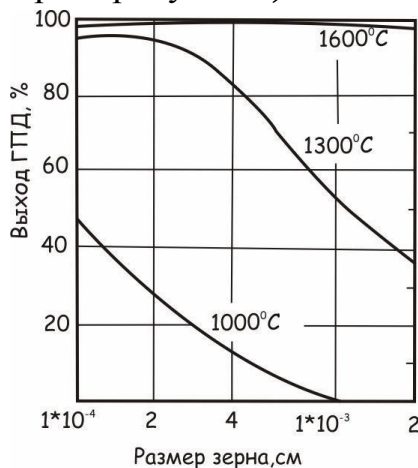


Рисунок 8 – Зависимость выхода ГПД от размерности зерна

#### 2.4.2.4 Расчет выхода ГПД из оксидного ядерного топлива

В теории, выход ГПД, как правило, рассматривали в связи с диффузией атомов газа в зерне или по границам зерен (после выхода из зерна). Решение диффузионного уравнения для выхода стабильных изотопов имеет вид:

$$F = \frac{4}{\sqrt{\pi}} \cdot \left( \frac{D \cdot t}{d^2} \right)^{\frac{1}{2}} - \frac{3 \cdot D \cdot t}{2 \cdot d},$$

где  $D$  – коэффициент диффузии;

$d$  – размер зерна.

На процессы диффузии влияет температура, состав, структурное состояние топлива, вид и концентрация дефектов. По этой причине расхождение в значениях используемых коэффициентов диффузии достигает шести порядков. Попытки учесть влияние отдельных факторов несколько уменьшают эти расхождения, но не позволяют увеличить достоверность получаемых коэффициентов диффузии.

Одновременно с диффузионными моделями разработаны и другие, согласно которым выход ГПД на границы зерен происходит главным образом за счет коагуляции и миграции газовых пузырей. Подобные модели более сложны и трудоемки по сравнению с диффузионными. Основные трудности связаны с процессами зарождения пузырей, их взаимодействия с дефектами структуры, с необходимостью учета распределения газовых пузырей по размерам [12].

Неопределенность исходных параметров, сложность теоретических моделей ограничивают их применение для определения выхода ГПД под оболочку ТВЭЛ. По этой причине в расчетах используют эмпирические инженерные модели. Такие модели получают в результате обобщения экспериментальных данных при облучении ТВЭЛ в различных реакторах с топливом, имеющим разные характеристики.

В таблице 6 приводятся данные по выделению газообразных продуктов деления из двуокиси урана, работающей на мощности.

Таблица 8 – Выделение газообразных продуктов деления от степени выгорания

| Выгорание $UO_2$ , % | Выделение ГПД, % |
|----------------------|------------------|
| 3                    | 8                |
| 7                    | 15               |
| 21                   | 16               |
| 25                   | 30               |
| 52                   | 37               |

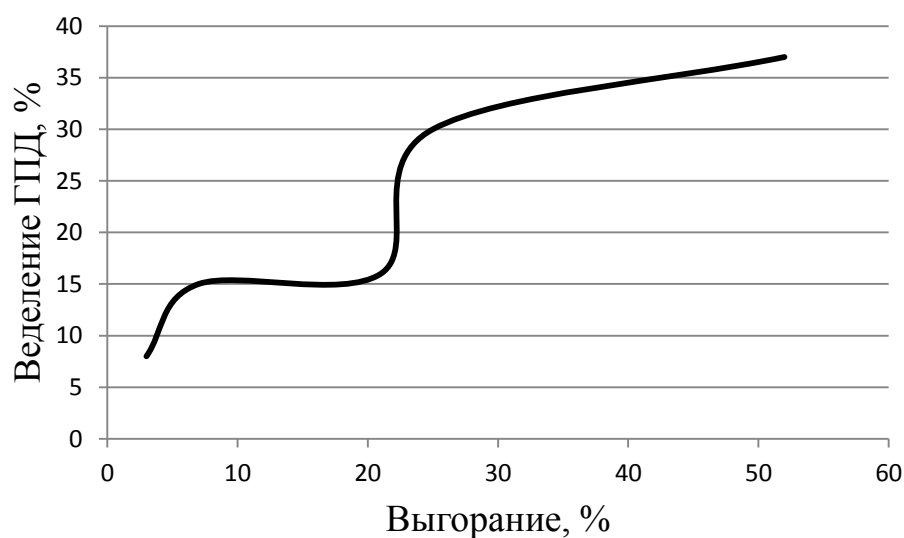


Рисунок 9 – Зависимость выхода ГПД от выгорания

По этой причине трудно выявить влияние выгорания на выделение ГПД, учитывая суммарное влияние таких факторов, как плотность, размер зерна, стехиометрия топлива, история облучения и т. п. Кроме того, в одних зонах выделение ГПД зависит от выгорания, а в других такая зависимость отсутствует.

## **Список публикаций**