МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»

Институт Ядерной Физики и Технологий

Кафедра № 5

«Теоретической и экспериментальной физики ядерных реакторов»

**Пояснительная записка**

к курсовому проекту на тему:

**«Проектирование ЯЭУ для плавучей атомной электростанции»**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Выполнил студент группы С14-105: | \_\_\_\_\_ | Голов П.А. |
| Руководитель проекта: | \_\_\_\_\_ | Щукин Н.В. |
| Консультант по теплофизическому расчету: | \_\_\_\_\_ | Деев В.И. |
| Консультант по нейтронно-физическому расчету: | \_\_\_\_\_ | Щукин Н.В. |
| Консультант по расчету биологической защиты: | \_\_\_\_\_ | Терновых М.Ю. |
| Консультант по экономическому расчету: | \_\_\_\_\_ | Гераскин Н.И. |

Москва 2018 г.

Оглавление

[Глава 2 Теплогидравлический расчет 3](#_Toc501382994)

[2.1 Исходные данные. 3](#_Toc501382995)

[2.2 Расчет КПД АППУ и тепловой мощности реактора. 9](#_Toc501382996)

[2.3 Выбор дополнительных геометрических характеристик ТВС и активной зоны реактора. 11](#_Toc501382997)

[2.4 Выбор параметров теплоносителя 1-ого контура РУ. 14](#_Toc501382998)

[2.5 Расчет средних тепловых характеристик активной зоны РУ. 15](#_Toc501382999)

[2.6 Расчеты распределения температур по высоте ТВС с максимальным энерговыделением. 17](#_Toc501383000)

[2.7 Оценка коэффициента запаса до кризиса теплообмена. 21](#_Toc501383001)

[2.8 Расчет гидравлических сопротивлений ТВС. 23](#_Toc501383002)

[Глава 3 Нейтронно-физический расчет 27](#_Toc501383003)

[3.1 Формирование картограммы загрузки реактора. 27](#_Toc501383004)

[3.2 Подготовка макроскопических констант. 32](#_Toc501383005)

[3.3 Стационарный расчет реактора в начале компании. 36](#_Toc501383006)

[3.4 Уточнение теплогидравлического расчета. 40](#_Toc501383007)

[3.5 Оценка компании реактора при однократной загрузке топлива. 42](#_Toc501383008)

# Глава 2 Теплогидравлический расчет

## 2.1 Исходные данные.

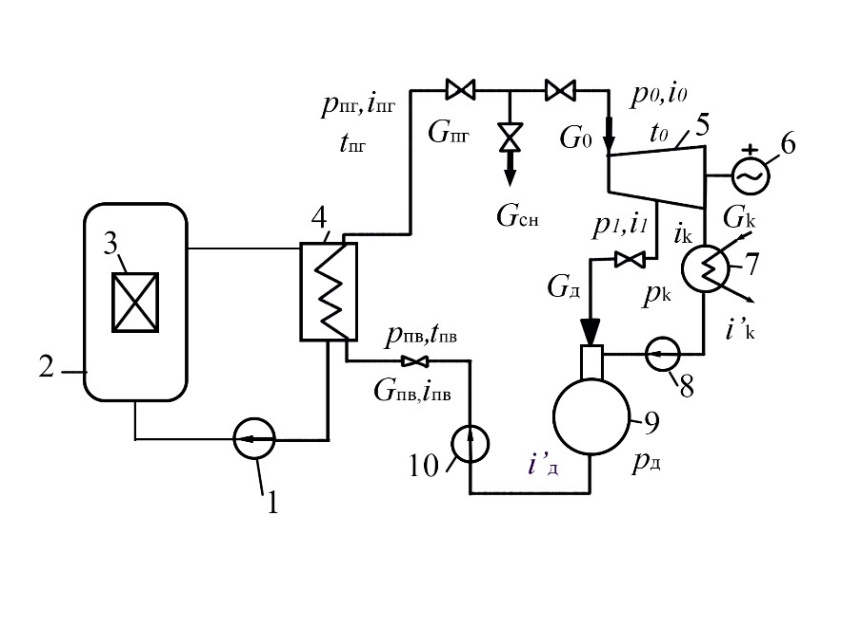
Приведем исходные данные, заданные на начальной стадии проекта.

1. Компоновка АППУ:

­­

**Рисунок 2.1** Блочная реакторная установка ПЭБ: 1 – защитная оболочка; 2 – бак железоводной защиты; 3 – стальная периферийная биологическая защита; 4 – трубопроводы; 5 – бетонная периферийная биологическая защита; 6 – арматура; 7 – полносъемная стальная выгородка; 8 – парогенератор; 9 – съемная биологическая защита парогенераторов; 10 – стационарная биологическая защита парогенераторов; 11 – реактор; 12 – насосы первого контура; 13 – съемная биологическая защита парогенераторов

1. Структурная тепловая схема РУ ПЭБ:



**Рисунок. 2.2** Принципиальная тепловая схема РУ ПЭБ для ПЭБ: 1-ЦНПК; 2 - ПГБ; 3 – активная зона реактора; 4 – ПГ; 5 – паровая турбина; 6 – электрогенератор; 7 – конденсатор; 8 – конденсатный насос; 9 – деаэратор; 10 - питательный насос

1. Конструкция основной ТВС реактора:



**Рисунок 2.3** Конструкция основной ТВС реактора: 1 – пэл; 2 – твэл; 3- СВП большего диаметра; 4 – СВП меньшего диаметра; 5 – кожух; 6 – вытеснитель; 7 – дистанционирующая решетка; 8 – дистанционирующая пластина пэлов; 9 – центральная трубка

1. Принципиальная конструктивная схема реактора:

**Рисунок 2.4** Реактор КЛТ-40С: 1 – щелевой фильтр; 2 – обечайка; 3 – пэл; 4 – РО КГ; 5 – патрубок парогенератора; 6 – корпус; 7 – стержни АЗ; 8 – биологическая защита; 9 – привод ИМ; 10 – привод ИМ КГ; 11 – верхняя плита; 12 – крышка; 13 – силовая плита; 14 – патрубок ЦНПК; 15 – выемной блок; 16 – активная зона; 17 - ТВС; 18 – донные экраны

1. Конструкция ТВС реактора:



**Рисунок 2.5** Конструкция ТВС реактора КЛТ-40С: 1 – дроссельная заслонка; 2 – шариковый замок; 3 – шток шарикового замка; 4 – хвостовик; 5 – нижняя опорная решетка; 6 – обойма пэлов; 7 – дистанционирующая решетка; 8 – верхняя решетка; 9 – вытеснитель; 10 – головка; 11 – пружина вытеснителя; 12 – РО КГ

1. Общие технические характеристики ПАТЭС:

Таблица 2.1 - Общие технические характеристики проектируемой ПАТЭС

|  |  |
| --- | --- |
| **Характеристика** | **Значение** |
| Установленная электрическая мощность , МВт | 35 |
| Установленная тепловая мощность системы теплоснабжения, Гкал/ч | 25 |
| Тип реактора | КЛТ-40С |
| Давление воды в первом контуре РУ, МПа | 12,7 |
| Температура воды на выходе из реактора, | 316 |
| Тип турбины | Конденсационная |
| Давление пара на входе в турбину, МПа | 3,43 |
| Температура воды на входе в турбину, | 285 |
| Число отборов пара | 1 |
| Давление пара в первом отборе, МПа | 0,9 |
| Давление в конденсаторе, Мпа | 0,005 |
| Давление в деаэраторе, Мпа | 0,115 |
| Давление питательной воды , МПа | 6 |
| Температура питательной воды , | 170 |
| Кампания активной зоны, лет | 2,5 - 3 |

1. Основные технические характеристики ТВС активной зоны:

Таблица 2.2 – Основные технические характеристики ТВС активной зоны

|  |  |
| --- | --- |
| **Характеристика** | **Значение** |
| Тип и форма ТВС | Чехловая с вытеснителем |
| Толщина шестигранного чехла ТВС , мм | 1,65 |
| Материал шестигранного чехла | Э-110 |
| Тип дистанционирующей решетки | Сотовая |
| Форма вытеснителя | Шестигранная |
| Толщина чехла вытеснителя , мм | 0,7 |
| Материал чехла | Э-110 |
| Диаметр центральной трубки , мм | 8,6 |
| Толщина стенки , мм | 0,5 |
| Материал трубки | Э-110 |
| Тип твэлов | Дисперсионный |
| Состав топливного сердечника | MOX + силумин |
| Обогащение по Pu-239, % | 52 |
| Обогащение по Pu-240, % | 24 |
| Обогащение по Pu-241, % | 15 |
| Диаметр твэла, мм | 6,8 |
| Длина активной части твэла, мм | 1300 |
| Максимально допустимая температура топлива | 600 |
| Толщина оболочки твэла , мм | 0,5 |
| Материал оболочки твэла | Э-110 |
| Максимально допустимая температура наружной поверхности оболочки | 334 |
| Эквивалентный диаметр компенсатора распухания , мм | 2,52 |
| Толщина стенки компенсатора распухания , мм | 0,15 |
| Материал компенсатора | Э-110 |
| Диаметр дистанционирующей проволоки , мм | 0,45 |
| Материал проволоки | Э-110 |
| Диаметр дистанционирующей спирали , мм | 1,1 |
| Количество твэлов , штук | 69 |
| Количество СВП мм , штук | 9 |
| Количество СВП мм , штук | 6 |
| Толщина оболочки СВП , мм | 0,5 |
| Материал оболочки СВП | Э-110 |
| Выгорающий поглотитель |  |
| Диаметр пэла , мм | 6,8 |
| Количество пэлов в кластере вытеснителя, штук | 7 |
| Толщина оболочки пэла , мм | 0,5 |
| Материал оболочки пэла | Э-110 |
| Поглотитель |  |

## 2.2 Расчет КПД АППУ и тепловой мощности реактора.

В дополнение к характеристикам, указанным в пункте 2.1, необходимо задать следующие значения:

Таблица 2.3 – Дополнительные характеристики для расчета КПД АППУ

|  |  |
| --- | --- |
| **Характеристика** | **Значение** |
| Удельная энтальпия на входе в турбину МДж/кг | 2,94 |
| Удельная энтропия на входе в турбину Дж/(кгк) | 6388,70 |
| Температура на выходе из конденсатора , | 32.88 |
| Удельная энтальпия воды при температуре свежего пара на выходе из конденсатора , МДж/кг | 0,14 |
| Удельная энтропия воды при температуре свежего пара на выходе из конденсатора , Дж/(кгк) | 476,25 |
| Удельная энтальпия питательной воды МДж/кг | 0,72 |
| Удельная энтропия питательной воды Дж/(кгк) | 2035,30 |
| КПД использования тепла | 0,98 |
| Внутренний относительный КПД турбины | 0,75 |
| Механический КПД | 0,97 |
| КПД электрогенератора | 0,98 |

Расчет КПД РУ КЛТ-40С производился по циклу Ренкина.



**Рисунок 2.6** Цикл Ренкина

Рассмотрим процессы, изображенные на рисунке 2.6:

1-2: подогрев до температуры насыщения; 2-3: испарение при давлении ; 3-4: работа в турбине; 4-5: конденсация отработавшего пара; 5-1: повышение давления питательными насосами от до .

Термический КПД цикла Ренкина без регенерации:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2.2.1) |

Термический КПД цикла Ренкина при идеальной регенерации:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2.2.2) |

Термический КПД с *n* регенеративными отборами. Примем n = 1.

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2.2.3) |

КПД брутто для всех типов установок:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2.2.4) |

Тепловая мощность реактора:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2.2.5) |

Результаты расчета представлены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Результаты расчета КПД АППУ и тепловой мощности реактора

|  |  |
| --- | --- |
| **Характеристика** | **Значение** |
| Термический КПД с *n* регенеративными отборами | 0.38 |
| КПД брутто | 0.26 |
| Тепловая мощность одного реактора ПЭБ, МВт | 132.8 |

## 2.3 Выбор дополнительных геометрических характеристик ТВС и активной зоны реактора.

Исходя из конструкции ТВС, водно-топливного отношения и учитывая количество и размер располагаемых в ней элементов, определим шаг между стержнями .

Относительный шаг:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2.3.1) |

Исходя из соображений компоновки (рисунок 2.7), зададим количество ТВС активной зоны РУ:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2.3.2) |



**Рисунок 2.7** Компоновка ТВС в активной зоне РУ

Определим эквивалентный диаметр активной зоны:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2.3.3) |

Результаты расчета дополнительных характеристик ТВС и активной зоны представлены в таблице 2.5 и таблице 2.6.

Таблица 2.5 – Дополнительные геометрические характеристики ТВС

|  |  |
| --- | --- |
| **Характеристика** | **Значение** |
| Шаг между стержнями в ТВС s, мм | 9,6 |
| Относительный шаг решетки x | 1,411 |
| Эквивалентный диаметр ячейки в бесконечной решетке , мм | 8,14 |
| Размер чехла кассеты под ключ , мм | 96 |
| Площадь поперечного сечения кассеты , | 7988 |
| Размер вытеснителя под ключ , мм | 28,2 |
| Площадь поперечного сечения вытеснителя , | 689 |
| Проходное сечение для теплоносителя в пучке твэлов и СВП , | 3831 |
| Смоченный периметр , мм | 2170 |
| Гидравлический диаметр , мм | 7,06 |
| Обогреваемый периметр , мм | 1474 |
| Тепловой диаметр , мм | 10,4 |
| Поверхность теплообмена , | 1,916 |

Таблица 2.6 – Дополнительные геометрические характеристики активной зоны

|  |  |
| --- | --- |
| **Характеристика** | **Значение** |
| Количество ТВС , шт. | 121 |
| Межкассетные промежутки , мм | 2 |
| Описанный диаметр активной зоны , мм | 1200 |
| Эквивалентный диаметр , мм | 1132 |
| Объем активной зоны (эквивалентный), | 1,309 |

## 2.4 Выбор параметров теплоносителя 1-ого контура РУ.

Необходимо определить среднюю скорость движения теплоносителя в 1-ом контуре РУ (в пучках твэлов и СВП). В реакторах с водяным теплоносителем эта величина составляет 2,5 ÷ 3,5 . Выберем

Зная скорость движения теплоносителя, можно определить расход теплоносителя в активной зоне:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2.4.1) |

где ρ – плотность теплоносителя при средней по высоте активной зоны температуре воды.

Далее можно найти расход теплоносителя на охлаждение твэлов и СВП одной ТВС без учета прохождения воды внутрь кожухов вытеснителя и через межкассетные зазоры:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2.4.2) |

Подогрев теплоносителя в реакторе можно определить, зная расход теплоносителя в активной зоне РУ и тепловую мощность реактора:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2.4.3) |

Зная подогрев теплоносителя и температуру на выходе из реактора, находим температуру на входе в реактор:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2.4.4) |

В итоге получаем параметры теплоносителя 1-ого контура реакторной установки. Коэффициент был взят равным 0,93.

Результаты расчета представлены в таблице 2.7.

Таблица 2.6 - Данные для расчета параметров теплоносителя 1-ого контура РУ

|  |  |
| --- | --- |
| **Характеристика** | **Значение** |
| Давление воды 1-ого контура p, МПа | 12,7 |
| Температура воды на выходе из реактора , | 316 |
| Средняя скорость воды в пучках твэлов и СВП , м/с | 3,2 |

Таблица 2.7 – Результаты расчета параметров теплоносителя 1-ого контура РУ

|  |  |
| --- | --- |
| **Характеристика** | **Значение** |
| Полный расход теплоносителя через реактор , кг/с | 1129 |
| Средний расход теплоносителя на охлаждение твэлов и СВП одной ТВС , кг/c | 8,68 |
| Подогрев воды в реакторе , | 20.32 |
| Температура воды на входе в реактор , | 295.7 |

## 2.5 Расчет средних тепловых характеристик активной зоны РУ.

Рассчитаем средние тепловые характеристики на основе полученных выше данных.

Удельная энергонапряженность активной зоны:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2.5.1) |

Средняя тепловая мощность ТВС (учитываем только мощность, выделяемую в твэлах):

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2.5.2) |

где - коэффициент (меньше единицы), учитывающий тот факт, что мощность, выделяемая в твэлах, немного меньше полной тепловой мощности реактора, так как часть тепла выделяется в воде и конструкционных материалах.

Средний линейный тепловой поток от твэлов (на единицу твэла):

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2.5.3) |

Средняя плотность теплового потока на поверхности твэлов:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2.5.4) |

Полученные значения представлены в таблице 2.8.

Таблица 2.8 – Результаты расчета тепловых характеристик активной зоны РУ

|  |  |
| --- | --- |
| **Параметр** | **Значение** |
| Удельная энергонапряженность активной зоны , МВт/ | 101.5 |
| Средняя тепловая мощность ТВС , МВ | 1.076 |
| Средний линейный тепловой поток от одного твэла Вт/см | 119.907 |
| Средняя плотность теплового потока на поверхности твэлов , МВт/ | 0.561 |

Расчеты проведены при .

## 2.6 Расчеты распределения температур по высоте ТВС с максимальным энерговыделением.

Зададим коэффициенты неравномерности и , отсюда . Зная коэффициенты неравномерности, найдем эффективные добавки: м, м.

Используем гидравлическое профилирование для того, чтобы подогрев теплоносителя ТВСМ был равен среднему значению подогрева воды в реакторе. При этом, расход и скорость воды в ТВСМ принимаются в раз больше средних значений.

Найдем изменение плотности теплового потока на поверхности максимально нагруженного (центрального) твэла по координате z по уравнению:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2.6.1) |

где . Результаты отражены на рисунке 2.8.



**Рисунок 2.8** Изменение плотности теплового потока на поверхности центрального максимально нагруженного твэла по высоте ТВСМ

Расчет распределений температур по высоте ТВСМ для воды, оболочки твэла и сердечника твэла проведен по формулам из пособия “Основы расчета судовых ЯЭУ” п. 4.2. Расчеты проведены при , .



**Рисунок 2.9** Распределение температуры воды по высоте ТВСМ



**Рисунок 2.9** Распределение температуры внешней оболочки твэла по высоте ТВСМ



**Рисунок 2.10** Распределение температуры внутренней оболочки твэла по высоте ТВСМ



**Рисунок 2.11** Распределение температуры топливного сердечника по высоте ТВСМ при

**

**Рисунок 2.12** Распределение температуры топливного сердечника по высоте ТВСМ при

Таблица 2.9 - Основные теплогидравлические характеристики ТВСМ

|  |  |
| --- | --- |
| **Характеристика** | **Значение** |
| Тепловая мощность , МВт | 1,528 |
| Удельная энергонапряженность , МВт/ | 144,060 |
| Средний линейный тепловой поток Вт/см | 170,272 |
| Средняя плотность теплового потока , МВт/ | 0,793 |
| Максимальная плотность теплового потока , МВт/ | 1,083 |
| Расход воды на охлаждение твэлов и СВП , кг/с | 12,326 |
| Средняя скорость воды в пучке твэлов и СВП , м/с | 4,544 |
| Средняя массовая скорость , кг/() | 3217 |
| Максимальная температура наружной поверхности оболочки , | 332,476 |
| Максимальная температура внутренней поверхности оболочки , | 362,091 |
| Максимальная температура топлива при Вт/(мК), | 414,492 |
| Максимальная температура топлива при Вт/(мК), | 493,324 |

Из расчетов видно, что максимальная температура наружной оболочки твэла составляет 332,5, что ниже допустимого проектного предела (334). Максимальная температура топливного сердечника в начале работы реактора составляет 414,5 , а, с учетом уменьшения коэффициента теплопроводности при высокой глубине выгорания топлива, составляет 493,3. В обоих случаях температура топливного сердечника ниже проектного предела.

На графике распределения температуры внешней оболочки твэла по высоте видно, что присутствует область, в которой температура внешней оболочки твэла выше температуры насыщения воды при давлении . Длинна этого участка составляет . Недогрев потока воды до температуры насыщения на данном участке, за исключением узкой зоны длинной , достаточно велик, и, как показывают расчеты, поверхностное кипение там маловероятно. Поверхностное кипение на участке может привести только к весьма небольшому снижению температуры наружной поверхности оболочки твэла (примерно 0,078 ).

## 2.7 Оценка коэффициента запаса до кризиса теплообмена.

Используем табличный метод определения критического теплового потока. Рассчитаем поправки к табличному критическому тепловому потоку.

– учитывает отличие теплового диаметра стандартной ячейки от базового значения 9,36 мм;

– учитывает относительный шаг расположения стержней;

– учитывает влияние на КТП входных условий сборки;

– учитывает турбулизирующее взаимодействие на кризис кипения решеток.

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2.7.1) |

Результаты расчета приведены в таблице 2.10.

Таблица 2.10 – Поправочные коэффициенты к табличным данным КТП

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  | K |
| 1,049 | 1,004 | 1,121 | 1,156 | 1,365 |

Используя таблицу критического теплового потока при кипении воды в сборках твэлов с треугольной упаковкой найдем табличные значения методом линейной интерполяции при давлении 12.7 Мпа и массовой скорости , а также вычислим значение критического потока с учетом поправок.

Таблица 2.11 - Табличные значения КТП

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| X | -0.2 | -0.2 | 0 | 0.1 | 0.2 |
| , МВт/ | 4,731 | 3,416 | 2,503 | 1,829 | 1,262 |
| , МВт/ | 6,458 | 4,663 | 3,416 | 2,496 | 1,723 |

Оценим коэффициент запаса до кризиса теплообмена методом касательной. Для этого, рассчитаем зависимость q(x) при увеличении нагрузки в n раз. Число n выбирается так, чтобы график зависимости q(x) и пересеклись в одной точке с учетом отклонения от рассчитанных данных. Отклонение от расчетных данных:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2.7.2) |

где

Таблица 2.12 - Значения относительной энтальпии воды и теплового потока на поверхности максимально нагруженных твэлов в различных сечениях ТВСМ

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| z, м | | 0 | 0,2 | 0,4 | 0,6 | 0,8 | 1,0 | 1,2 | 1,3 |
|  | X | -0,171 | -0,162 | -0,146 | -0,125 | -0,104 | -0,086 | -0,073 | -0,069 |
| q, МВт/ | 0,273 | 0,664 | 0,947 | 1,078 | 1,034 | 0,822 | 0,478 | 0,273 |
| 2,0 | X | -0,171 | -0,152 | -0,120 | -0,080 | -0,037 | 0,002 | 0,026 | 0,033 |
| q, МВт/ | 0,545 | 1,328 | 1,895 | 2,156 | 2,068 | 1,645 | 0,956 | 0,545 |

**

**Рисунок 2.13** Определение запаса до кризиса теплообмена

Был построен график для определения запаса до кризиса теплообмена. Из графика видно, что в точках и есть вероятность возникновения кризиса теплообмена, который может произойти в сечении ТВСМ на расстоянии

В итоге можно сделать вывод, что на этапе предварительного теплового расчета критическая мощность ТВСМ составляет:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2.7.3) |

а коэффициент запаса до кризиса теплообмена:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2.7.4) |

## 2.8 Расчет гидравлических сопротивлений ТВС.

Расчет гидравлических сопротивлений проведем, используя конструкцию ТВС, показанную на рисунке 2.5.

Полная потеря давления при движении теплоносителя в каналах активной зоны реактора:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2.8.1) |

где – сопротивление трения, – местные сопротивления, – сопротивления, связанные с ускорением потока, – нивелированный, гидростатический напор. В нормальных условиях эксплуатации реакторов с водой под давлением последние две составляющие малы по сравнению с первыми двумя членами, поэтому в расчете мы ими пренебрегаем.

Для того, чтобы обеспечить одинаковый подогрев теплоносителя в каналах реактора расход воды на охлаждение центральных ТВС должен быть больше, чем на охлаждение ТВС периферийной группы. В реакторах с гидравлических профилированием такой эффект достигается распределением расхода теплоносителя по радиусу активной зоны при помощи специальных органов регулирования расхода (шайбы или дроссельные заслонки), устанавливаемых на входе ТВС.

Рассчитаем гидравлические сопротивления, основываясь на характеристиках, полученных для ТВСМ, в которой расход теплоносителя максимален, а дроссельные заслонки открыты так, что их сопротивление минимально.

Расcчитаем сопротивление трения в пучке твэлов и СВП ТВСМ:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2.8.2) |

где – коэффициент сопротивления трения.

Таблица 2.13 - Сопротивление трения в пучке твэлов и СВП в ТВСМ

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| w, м/с | Re |  |  |  |
| 4,544 |  | 0,014 | 0,017 | 19,67 |

Рассчитаем местные сопротивления. При расчете необходимо учесть:

– сопротивление входных участков сборки;

– сопротивление выходных участков сборки;

– сопротивление нижней опорной решетки стержней;

– сопротивление верхней опорной решетки стержней;

– сопротивление дистанционирующих решеток;

– сопротивление дроссельной заслонки;

Так как мы рассматриваем канал, в котором расход теплоносителя максимален, принимаем сопротивление дроссельной заслонки Количество дистанционирующих решеток примем равным пяти. Результаты расчета:

Таблица 2.14 - Местные сопротивления в ТВСМ

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  |  |  |  | , кПа |
| 6 | 4 | 2 | 3 | 1,1 | 0 | 16,1 | 117,68 |

В итоге получаем, что потери давления в ТВС составляет 137,35 кПа. Примем КПД циркуляционного насоса равным .

Затраты мощности на прокачку теплоносителя:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2.8.3) |

где – объемный расход теплоносителя,  *–* КПД циркуляционного насоса. Затраты мощности на прокачку теплоносителя малы и составляют приблизительно 1% от электрической мощности реактора (

# Глава 3 Нейтронно-физический расчет

## 3.1 Формирование картограммы загрузки реактора.

Данные по конструкции ядерных реакторов и структуре активных зон судовых установок в доступной литературе предоставлены неполно, в связи с этим при проектировании морского транспортного реактора следует ориентироваться на теплофизические и нейтронно – физические параметры, а также конструктивные решения, принятые в уже существующих судовых ядерных установках и реакторах типа ВВЭР. Кроме того, в дальнейшем, выбранная компоновка активной зоны будет корректироваться рядом взаимоуточняющих нейтронно-физических и теплогидравлических расчетов.

Активная зона проектируемого реактора содержит:

* два типа твэлов разного обогащения: “легкие” твэлы и “тяжелые” твэлы;
* два типа СВП: меньшего и большего диаметра;
* кластеры, содержащие компенсирующие стержни (ПЭЛы);
* стержни аварийной защиты (АЗ).

Рассмотрим основные типы и состав ТВС активной зоны:

Таблица 3.1 – Типы и состав ТВС активной зоны реактора

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Тип ТВС | Число ТВС | Число “легких” твэлов | Число “тяжелых” твэлов | Число СВП большего диаметра | Число СВП меньшего диаметра |
| ТВС центральной зоны | 19 | 69 | - | 9 | 6 |
| ТВС периферийной зоны | 92 | 18 | 51 | 9 | 6 |
| ТВС со стержнем АЗ | 6 | 18 | 51 | 9 | 6 |
| ТВС с пустым каналом | 4 | 18 | 51 | 9 | 6 |

Конструкция всех типов ТВС практически одинакова и отличается лишь составом твэлов и формой центрального вытеснителя.

Рассмотрим схемы всех ТВС активной зоны реактора:

1. ТВС периферийной зоны:



**Рисунок 3.1** Схема ТВС периферийной зоны

1. ТВС центральной зоны:



**Рисунок 3.2** Схема ТВС центральной зоны

1. ТВС со стержнем АЗ:



**Рисунок 3.3** Схема ТВС со стержнем АЗ

1. ТВС с пустым каналом:



**Рисунок 3.4** Схема ТВС с пустым каналом

На всех схемах приняты следующие обозначения:

1 – тяжелые твэлы; 2 – легкие твэлы; 3 – СВП большего диаметра; • - СВП меньшего диаметра; 5 – ПЭЛы; 6 – стержень АЗ; 8 – пустой канал.

Основные параметры ТВС указаны в тепловом расчете.

Решетка твэлов и СВП заполнена теплоносителем. В центральной и периферийных ТВС пространство также заполнено теплоносителем и предназначено для размещения компенсирующих ПЭЛов. Вытеснитель в ТВС со стержнем АЗ и пустым каналом имеет форму толстостенной гильзы и заполнен воздухом для предотвращения гидравлического сопротивления в аварийной ситуации.

ТВС периферийной зоны содержат твэлы всех типов обогащения и составляют основную массу ТВС активной зоны ЯЭУ. В случае отсутствия ПЭЛов, в вытеснители остается теплоноситель, хорошо замедляющий нейтроны, что способствует образованию всплеска энерговыделения в твэлах, окружающий вытеснитель. Для компенсации всплеска и выравнивания энерговыделения ТВС вокруг чехла размещаются стержни СВП меньшего диаметра, а также внешнее кольцо стержней СВП большего диаметра.

ТВС центральной зоны содержат только “легкие” твэлы.

ТВС со стержнями АЗ расположены парами в разных частях активной зоны. В случае аварийной ситуации, все 6 стержней аварийной защиты сбрасываются, в результате чего цепная реакция деления должна быть прекращена. Для оперативности сброса стержней АЗ, вытеснитель ТВС со стрежнем АЗ заполнен воздухом.

ТВС с пустым каналом располагаются вблизи отражателя активной зоны и предназначены для размещения пускового источника нейтронов, детекторов нейтронного поля и термопреобразователей.

Рассмотрим основные элементы ТВС и их составы. Данные, приведенные в таблице 3.2 в дальнейшем будут использованы для расчета и формирования библиотеки макроскопических констант, необходимых для дальнейшего нейтронно – физического расчета.

Таблица 3.2 – Элементы ТВС активной зоны реактора

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Элемент ТВС | Материал, его состав и плотность (г/ ) | Химические элементы, основные изотопы |
| Сердечник “тяжелого” твэла, Pu 30% | МОКС-топливо (U, | , , , , |
| Сердечник “тяжелого” твэла, Pu 28% |
| Сердечник СВП меньшего диаметра | , , естественный состав | , , |
| Сердечник СВП большего диаметра |
| Сердечник ПЭЛа | , | , |
| Сердечник стержня АЗ | , |
| Теплоноситель | O, | , |
| Пустой канал | Воздух, 75% + 25% , | , |
| Чехол ТВС | Сплав Э-110 (Zr + 1% Nb), |  |
| Конструкционный материал |
| Чехол вытеснителя для ПЭЛов |
| Оболочка СВП |
| Гильза для стержня АЗ |
| Оболочка твэла |
| Оболочка ПЭЛа | Сплав 42ХНМ (42% Сr + 56% Ni) |  |

**Рисунок 3.5** Схема активной зоны реактора

## 3.2 Подготовка макроскопических констант.

Для дальнейшего нейтронно-физического расчета, необходимо найти двухгрупповые макроскопические параметры для каждого типа ТВС. Более того, для ТВС центральной и периферийной зон необходимо знать макроскопические параметры в двух случаях: в случае погруженных ПЭЛов и в случае выведенных ПЭЛов из активной зоны реактора, аналогично для ТВС со стержнем АЗ: в случае сброшенного стержня аварийной защиты и в случае, когда стержень аварийной защиты выведен из реактора.

Расчет всех необходимых макроконстант выполним при помощи программы GETERA. В программе задается модель полиячейки, параметрами которой являются:

* концентрация нуклидов в каждой отдельной зоне;
* кратность ячеек;
* матрица перетечек нейтронов между ячейками;
* температуры зон ячеек.

Концентрации нуклидов рассчитаем по формуле:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (3.2.1) |

где – массовая доля; – плотность вещества; – молярная масса вещества.

Приведем таблицу концентраций основных веществ активной зоны, на основе которой можно рассчитать концентрации отдельных нуклидов:

Таблица 3.3 – Свойства веществ, содержащихся в активной зоне

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Вещество |  |  |
| Диоксид урана U |  | 0,0220 |
| Оксид гадолиния |  | 0,0126 |
| Карбид бора |  | 0,0288 |
| Вода O |  | 0,0233 |
| Кислород | *,* | 0,0045 |
| Азот | *,* | 0,0144 |
| Цирконий Zr |  | 0,0429 |
| Никель Ni | *,* | 0,0520 |
| Хром Cr | *,* | 0,0350 |

В программе GETERA задается 6 типов ячеек:

* “тяжелый” твэл;
* “легкий” твэл;
* СВП большего диаметра;
* СВП меньшего диаметра;
* ПЭЛ;
* Конструкционный материал.

Матрица перетечек нейтронов между ячейками определяется следующим образом: рассчитывается вероятность перехода нейтрона из ячейки *i* в ячейку *j* как отношение площади, смежной между обоими типами ячеек поверхности к площади поверхности ячейки типа *i.*

|  |  |
| --- | --- |
|  | (3.2.2) |

Результаты расчета матриц перетечек для различных ТВС приведены в таблицах 3.4 и 3.5.

Таблица 3.4 - Матрица перетечек для центральной и периферийной ТВС

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Тип ячейки |  | | | | | |
| “Тяжелый” твэл | “Легкий” твэл | СВП большего диаметра | СВП меньшего диаметра | ПЭЛ | КМ |
| “Тяжелый” твэл | 0,5882 | 0,1372 | 0,1176 | 0,0000 | 0,0000 | 0,1586 |
| “Легкий” твэл | 0,3888 | 0,3333 | 0,0000 | 0,2222 | 0,0555 | 0,0000 |
| СВП большего диаметра | 0,6666 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,3333 |
| СВП меньшего диаметра | 0,0000 | 0,6666 | 0,0000 | 0,0000 | 0,3333 | 0,0000 |
| ПЭЛ | 0,0000 | 0,1428 | 0,0000 | 0,2857 | 0,5714 | 0,0000 |
| КМ | 0,2222 | 0,0000 | 0,0833 | 0,0000 | 0,0000 | 0,6944 |

Таблица 3.5 - Матрица перетечек для ТВС со стержнем АЗ и ТВС с пустым каналом

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Тип ячейки |  | | | | | |
| “Тяжелый” твэл | “Легкий” твэл | СВП большего диаметра | СВП меньшего диаметра | ПЭЛ | КМ |
| “Тяжелый” твэл | 0,5882 | 0,1372 | 0,1176 | 0,0000 | 0,0000 | 0,1586 |
| “Легкий” твэл | 0,3888 | 0,3333 | 0,0000 | 0,2222 | 0,0555 | 0,0000 |
| СВП большего диаметра | 0,6666 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,3333 |
| СВП меньшего диаметра | 0,0000 | 0,6666 | 0,0000 | 0,0000 | 0,3333 | 0,0000 |
| ПЭЛ | 0,0000 | 0,5000 | 0,0000 | 0,5000 | 0,0000 | 0,0000 |
| КМ | 0,2222 | 0,0000 | 0,0833 | 0,0000 | 0,0000 | 0,6944 |

Температуры зон ячеек возьмем из теплогидравлического расчета.

На основе вышепредставленных данных были расcчитаны макроскопические параметры для всех типов ТВС, необходимые для дальнейшего стационарного и динамического расчета. Были получены:

* коэффициенты диффузии D;
* сечения поглощения ;
* сечения деления ;
* матрицы межгруппового перевода ;
* сечения генерации нейтронов .

## 3.3 Стационарный расчет реактора в начале компании.

Стационарный расчет реактора в начале компании проведем при помощи программы SKETCH для нейтронно-физического расчета активной зоны реактора.

На начальном этапе расчета необходимо задать входные данные, необходимые для расчета:

* картограмму загрузки реактора;
* тепловую мощность реактора;
* разбиение активной зоны по высоте на слои;
* макроскопические параметры всех типов ТВС.

Картограмма загрузки активной зоны реактора составляется на основе рисунка 3.4.

Тепловую мощность реактора возьмем из теплогидравлического расчета и примем = 132.8 МВт. Высоту активной зоны разобьем на слои по 0.13 м. Макроскопические параметры всех типов ТВС были получены в пункте 3.2 данной главы.



**Рисунок 3.6** – Картограмма загрузки реактора для программы SKETCH: 1 – ТВС центральной зоны; 2 – ТВС периферийной зоны; 3 – ТВС со стержнем АЗ; 4 – ТВС с пустым каналом; 5 – отражатель

Для начала необходимо провести расчет условно – критической задачи для определения критической загрузки. Для этого будем погружать поглощающие стержни на различную глубину и следить за изменением эффективного коэффициента размножения . Предполагаем вначале, что глубина погружения всех стержней одинакова Результаты представлены на рисунке 3.7.



**Рисунок 3.7** График зависимости от глубины погружения поглощающих стержней

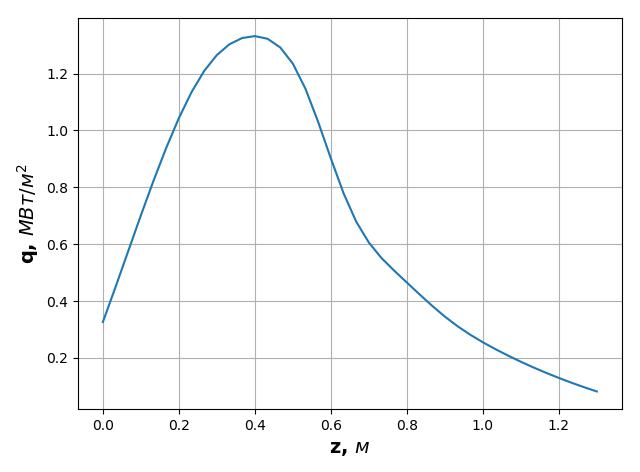
Из расчета следует, что глубина поглощающих стержней, при которой реактор становится критичным, равна 0.85 м.

Определим эффективность системы аварийной защиты. Для этого приведем реактор в критическое состояние и опустим стержни аварийной защиты. Результаты расчетов приведены в таблице 3.6.

Таблица 3.6 - Воздействие органов аварийной защиты на реактивность

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Количество групп АЗ |  |  |
| Одна группа стержней | 0,006053 | 0,003947 |
| Две группы стержней | 0,991576 | 0,008424 |
| Три группы стержней | 0,986962 | 0,013038 |

Программа SKETCH позволяет получить данные о энерговыделении в активной зоне, коэффициенты . На рисунке 3.8 представлено распределение плотности теплового потока на поверхности центрального максимально нагруженного твэл по высоте ТВСМ.



**Рисунок 3.8** Распределение плотности теплового потока на поверхности максимально нагруженного твэла по высоте ТВСМ

Таблица 3.7 – Параметры поля энерговыделения активной зоны

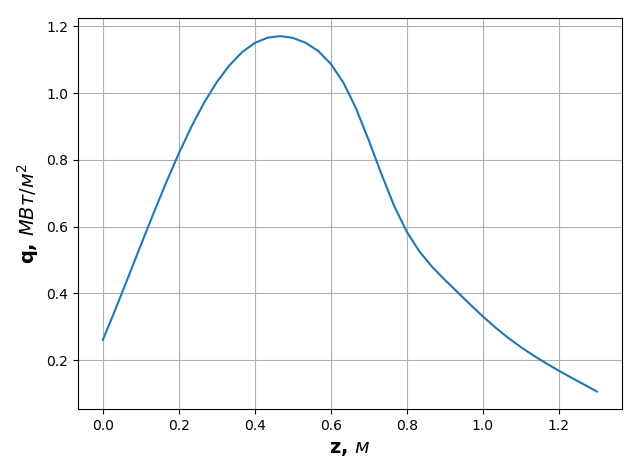
|  |  |
| --- | --- |
| Параметр | Значение |
| Коэффициент неравномерности тепловыделения по радиусу | 1,164 |
| Коэффициент неравномерности тепловыделения по высоте | 2,043 |
| Коэффициент неравномерности тепловыделения по объему | 2,378 |

Найденное поле энерговыделения имеет коэффициент неравномерности по объему , что превышает значение, полученное в теплогидравлическом расчете (). Попробуем выровнять поле энерговыделения за счет поиска более оптимального размещения поглощающих стержней.

Схема активной зоны реактора состоит из двух основных групп: периферийной и центральной. Для выравнивания поля энерговыделения поднимем поглощающие стержни периферийной зоны на 1 слой вверх (0.13 м). Решая условно – критическую задачу, получаем, что реактор достигает критического состояния при полностью погруженных центральных поглощающих стержнях (рисунок 3.9).

**Рисунок 3.9** График зависимости от глубины погружения поглощающих стержней центральной зоны

Аналогично, найдем распределение плотности теплового потока и параметры поля энерговыделения активной зоны:



**Рисунок 3.10** Распределение плотности теплового потока на поверхности максимально нагруженного твэла по высоте ТВСМ

Таблица 3.8 – Параметры поля энерговыделения активной зоны

|  |  |
| --- | --- |
| Параметр | Значение |
| Коэффициент неравномерности тепловыделения по радиусу | 1,122 |
| Коэффициент неравномерности тепловыделения по высоте | 1,770 |
| Коэффициент неравномерности тепловыделения по объему | 1,985 |

В результате можно заметить, что поле энерговыделения получило более выровненную форму, чем в первоначальном варианте, а коэффициент неравномерности по объему приблизился к значению, полученному в теплогидравлическому расчете. Благодаря этому, была снижена нагрузка на максимально нагруженный твэл.

## 3.4 Уточнение теплогидравлического расчета.

На основе данных, полученных в пункте 4.3, проведем уточнение теплогидравлического расчета. Для этого, рассмотрим тепловыделяющую сборку с максимальным энерговыделением (ТВСМ) и построим температурные зависимости по высоте ТВСМ.



**Рисунок 3.11** Распределения температур ТВСМ

Из рисунка 3.11 видно, что максимальная температура топлива при значительно ниже проектного предела (600 ), более того, даже при уменьшении коэффициента теплопроводности топлива при высокой глубине выгорания максимальная температура составляет , что удовлетворяет проектному пределу. Температура воды не превышает температуру насыщения при давлении . Температура внешней оболочки твэла превышает температуру насыщения воды на значительном участке, однако, как показывает расчет, недогрев потока воды до температуры насыщения на данном участке достаточно велик, следовательно, поверхностное кипение здесь маловероятно. Кроме того, температура внешней оболочки твэла , что меньше проектного предела 334 . Из вышесказанного можно сделать вывод о том, что полученная конфигурация активной зоны удовлетворяет теплогидравлическим требованиям.

## 3.5 Оценка компании реактора при однократной загрузке топлива.

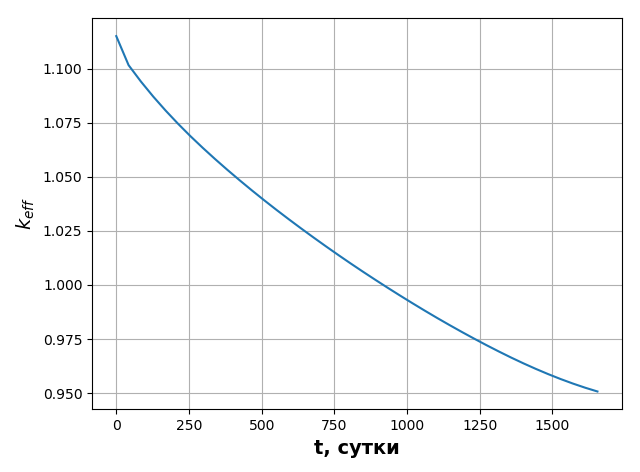
Проведем оценку компании реактора, а также выгорания топлива при однократной загрузке реактора. Основным критерием определения длительности компании является выход реактора в критическое состояние. Следовательно, для оценки компании реактора и потенциала топлива необходимо построить графики зависимости и

Для предварительной оценки компании реактора временно перейдем от рассмотрения пространственного распределения выгорания топлива в активной зоне к рассмотрению отдельной ТВС. В рассматриваемом проекте присутствуют 2 типа ТВС – центральные и периферийные, отличающиеся типами твэлов. Так как обогащение двух различных типов твэлов отличается на 2%, что не дает заметных отличий в выгорании, произведем расчет для одного типа ТВС (центрального).

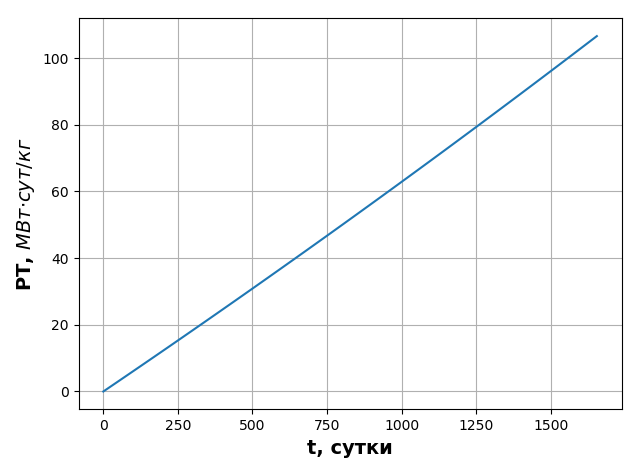
Воспользуемся средствами программы GETERA. На каждом шаге выгорания (шаг примем равным 50 суток) будем вычислять значение . Так как программа GETERA позволяет получить только значение , необходимо умножать его на вероятность утечки нейтрона из реактора, полученную следующим образом:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (3.2.2) |

где значение было получено с помощью программы SKETCH. Для упрощения расчетов считаем, что не зависит от выгорания топлива. Полученные зависимости представлены на рисунках 3.12 и 3.13.



**Рисунок 3.12** График зависимости эффективного коэффициента размножения нейтронов от времени



**Рисунок 3.13** График зависимости выгорания топлива от времени

Из графиков видно, что реактор станет критичным в момент суток, что составляет приблизительно 2,5 года, а среднее выгорания топлива в конце компании реактора составляет 57 . Компания активной зоны по проекту составляет 2,5 – 3 года, что соответствует полученным результатам.