**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:

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) |  |

Данные, приведенные в таблице 3.2 в дальнейшем будут использованы для расчета и формирования библиотеки макроскопических констант, необходимых для дальнейшего нейтронно – физического расчета.

**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:

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.*

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.



**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

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.

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

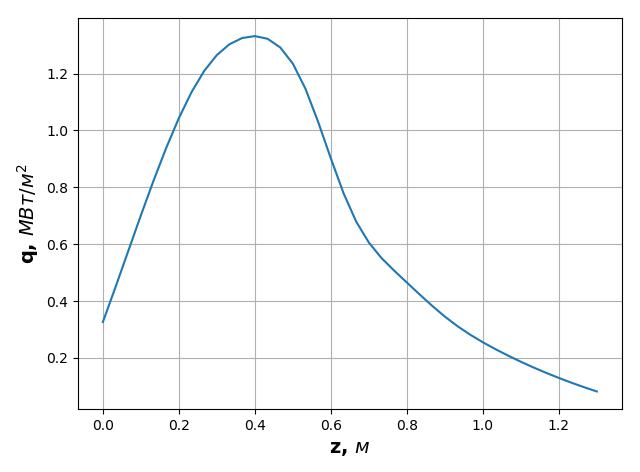
Из расчета следует, что глубина поглощающих стержней, при которой реактор становится критичным, равна 0.85 м.

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 |

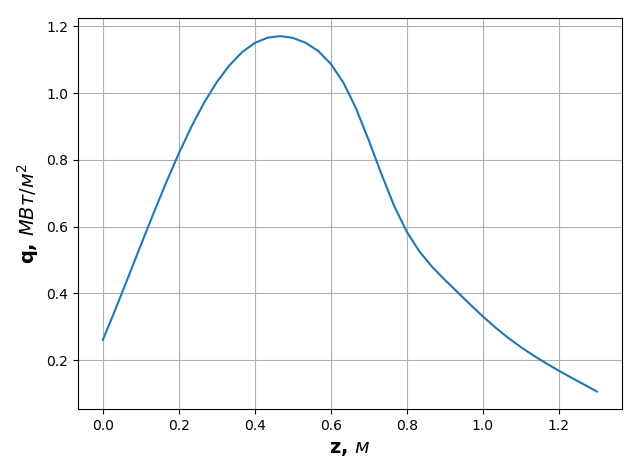
Найденное поле энерговыделения имеет коэффициент неравномерности по объему , что превышает значение, полученное в теплогидравлическом расчете (). Попробуем выровнять поле энерговыделения за счет поиска более оптимального размещения поглощающих стержней.

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:



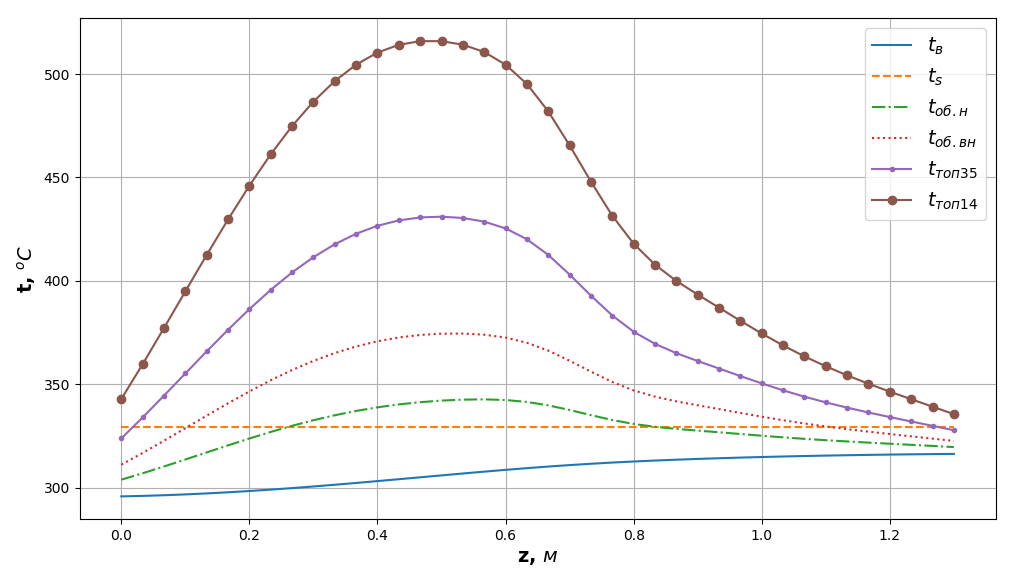
**Рисунок 3.10** Распределение плотности теплового потока на поверхности максимально нагруженного твэла по высоте ТВСМ

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.

**4.4 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. Из вышесказанного можно сделать вывод о том, что полученная конфигурация активной зоны удовлетворяет теплогидравлическим требованиям.

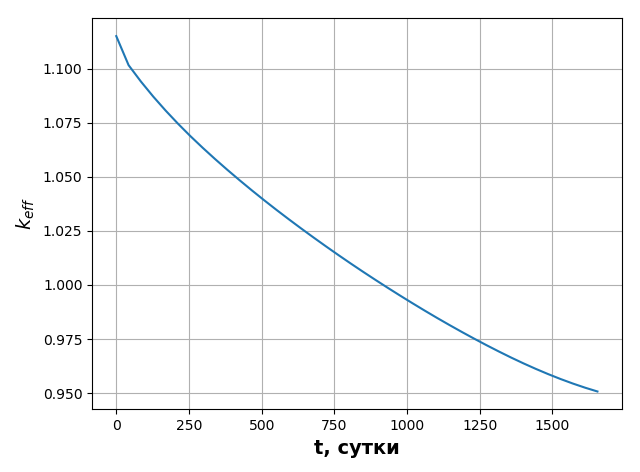
**4.5 Оценка компании реактора при однократной загрузке топлива.**

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

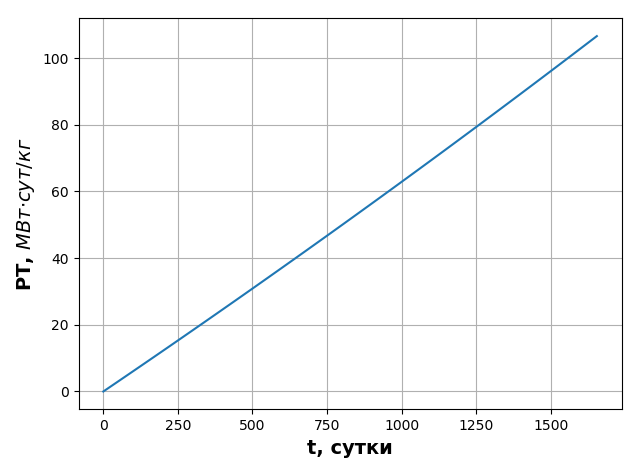
Для предварительной оценки компании реактора временно перейдем от рассмотрения пространственного распределения выгорания топлива в активной зоне к рассмотрению отдельной ТВС. В рассматриваемом проекте присутствуют 2 типа ТВС – центральные и периферийные, отличающиеся типами твэлов. Так как обогащение 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:

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.