Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования

«Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина»

Физико-технологический институт

Кафедра технической физики

Расчет реактора ВВЭР-440

Отчет по курсовому проекту

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| /ГоризПоз=слева /ГоризПозОтносительно=текстРуководительк. ф.-м. н. | \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_.\_\_.19 | Александров О.Е.  |
|  |  |  |
| Студентгр. Фт -450014  | \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_.\_\_.19 | Селихов Н.О. |

Екатеринбург 2019

# Оглавление

[Оглавление 2](#_Toc5041272)

[Введение 3](#_Toc5041273)

[Основные характеристики ВВЭР-440 6](#_Toc5041274)

[Теплофизический расчет 6](#_Toc5041275)

[2. Нейтронно-физический расчёт 11](#_Toc5041276)

[2.1 Расчет ядерных плотностей веществ 11](#_Toc5041277)

[2.2 Расчёт макроскопических сечений 11](#_Toc5041278)

[2.3 Расчёт коэффициента размножения бесконечного реактора по методу четырёх сомножителей. 14](#_Toc5041279)

[2.3.1 Коэффициент размножения на быстрых нейтронах 14](#_Toc5041280)

[2.3.2 Вероятность избежать резонансного поглощения 15](#_Toc5041281)

[2.3.3 Коэффициент использования тепловых нейтронов 17](#_Toc5041282)

[2.3.4 Число вторичных нейтронов деления на один поглощённый топливом нейтрон 19](#_Toc5041283)

[3. Расчет кампании ректора ВВЭР-440 20](#_Toc5041284)

[3.1. Изменение концентрации топливных компонент в реакторе 20](#_Toc5041285)

[3.2. Отравление реактора 22](#_Toc5041286)

[3.3. Шлакование реактора 22](#_Toc5041287)

[3.4. Расчет кампании реактора 23](#_Toc5041288)

[3.5. Воспроизводство делящегося материала 24](#_Toc5041289)

[3.6. Расчет органов управления реактора 24](#_Toc5041290)

# Введение

ВВЭР – водо-водяной энергетический реактор корпусного типа с гетерогенной активной зоной с тепловым спектром нейтронов. В качестве топлива используется диоксид урана UO2, обогащенный по 235U, в качестве замедлителя – обычная вода, которая одновременно является теплоносителем.

Принципиальное устройство ВВЭР-440 показано на рисунке 1 соответственно. В состав реактора входит следующее оборудование: корпус, внутрикорпусные устройства, активная зона, верхний блок, блок электроразводок.

Корпус реактора является основной несущей конструкцией. Он висит, опираясь опорным буртом на бетонную консоль. К патрубкам корпуса привариваются трубопроводы главного циркуляционного контура.

Активная зона реакторов собрана из шестигранных тепловыделяющих сборок (ТВС), содержащих тепловыделяющие элементы (ТВЭЛ) стержневого типа с сердечником из диоксида урана в виде таблеток, находящихся в оболочке из циркониевого сплава. В тепловыделяющих сборках ТВЭЛы размещены по треугольной решетке и заключены в чехол из циркониевого сплава. В свою очередь, ТВС также собраны в треугольную решетку. Нижние цилиндрические части ТВС входят в отверстия опорной плиты, верхние в дистанционирующую прижимную. Сверху на активную зону устанавливается блок защитных труб, дистанционирующий кассеты и предотвращающий всплытие и вибрацию. Устройство ТВС и ТВЭЛ ВВЭР-440 изображено на рисунке2.

Теплоноситель поступает в реактор через входные патрубки корпуса, затем через отверстия в опорной конструкции шахты поднимается вверх через топливные сборки. Нагретый теплоноситель выходит из головок ТВС в пространство блока защитных труб и через обечайку блока и шахты отводится выходными патрубками из реактора.



Рисунок 1. Реактор ВВЭР-440



Рисунок 2. ТВС и ТВЭЛ реактора ВВЭР-440

# Основные характеристики ВВЭР-440

Таблица 1.

Параметры ВВЭР-440

|  |  |
| --- | --- |
| Тепловая мощность реактора, МВт | 1375 |
| Электрическая мощность реактора, МВт | 440 |
| Диаметр активной зоны, м | 2,88 |
| Высота активной зоны, м | 2,5 |
| Число ТВС в активной зоне, шт | 349 |
| Число ТВЭЛов в ТВС, шт | 126 |
| Диаметр ТВЭЛа, мм | 9,1 |
| Внутренний диаметр оболочки ТВЭЛа, мм | 7,73 |
| Длина ТВЭЛа (с хвостовиками),мм | 2536 |
| Диаметр топливной таблетки внешний, мм | 7,57 |
| Диаметр отверстия в топливной таблетке, мм | 1,2 |
| Плотность топлива, г/см3 | 10,4 |
| Шаг решетки, мм | 12,2 |
| Размер под «ключ» шестигранника ТВС внешний, мм | 145 |
| Давление на входе в активную зону, МПа | 12,405 |
| Давление на выходе из активной зоны, МПа | 12,115 |
| Средняя температура теплоносителя на входе в активную зону, К | 539,7 |
| Средняя температура теплоносителя на выходе из активной зоны, К | 568 |
| Расход теплоносителя через реактор в м3/ч | 42950 |

# Теплофизический расчет

Рассчитаем среднее энерговыделение по объему активной зоны:

Где QT  - тепловая мощность реактора (МВт), *Vа.з.* – объем активной зоны (м3)

Рассчитаем коэффициенты неравномерности энерговыделения по радиусу и высоте активной зоны. Используем эффективные добавки, определенные в нейтронно-физическом расчете:

Коэффициент неравномерности энерговыделения по объему активной зоны равен произведению коэффициентов неравномерности по радиусу и высоте:

Тепловая мощность центрального канала равна:

Массовый расход теплоносителя через центральный канал определяется:

где *GT* – массовый расход теплоносителя через активную зону реактора (кг/с), *NТВС* – число топливных сборок в активной зоне ректора.

1. Распределение температуры теплоносителя по высоте активной зоны определяется формулой:
2. Распределение температуры в оболочке ТВЭЛа определяют по формуле:

где *ql(z)* – погонное энерговыделение (Вт/м), *Rα* – термическое сопротивление конвективного теплообмена между оболочкой ТВЭЛ и теплоносителем.

 Полное энерговыделение определяется по формуле:

Термическое сопротивление теплопроводности материала оболочки ТВЭЛа определяется по формуле:

где *dоб*=9,1 мм – диаметр оболочки ТВЭЛа, *α* – коэффициент теплоотдачи между оболочкой и теплоносителем (Вт/(м2\*K)

где *Nu* – число Нуссельта, *λтепл* – теплопроводность теплоносителя (Вт/(м\*K)

Число Нуссельта для теплообмена в решетке ТВЭЛ с тереугольной геометрией можно найти по следующей формуле:

где *A* – константа, определяемая по формуле:

Где *l*=12,2 мм – шаг решетки, *Pr* – число Прандтля,

*Re* – число Рейнольдса, определяемое по формуле:

Где dг – эквивалентный гидравлический диаметр (м), SТ – площадь поперечного сечения, занятая теплоносителем, η – динамическая вязкость (Па\*с).

Эквивалентный гидравлический диаметр определяется по формуле

Где Pсм – периметр смачивания.

1. Распределение температуры в контактном зазоре ТВЭЛа определяют по следующей формуле:

Где *Rλоб* – термическое сопротивление теплопроводности оболочки (м\*K/Вт), определяемое соотношением:

Где λоб=22,7[Вт/(м\*K)] – коэффициент теплопроводности оболочки ТВЭЛ, rк=4\*10-3[м] – радиус контактного зазора

1. Распределение температуры в топливном блоке ТВЭЛа определяют по формуле:

Где *Rλк* – термическое сопротивление теплопроводности контактного зазора (м\*K/Вт)

Где λk=0,37[Вт/(м\*K)] – коэффициент теплопроводности оболочки ТВЭЛ, rк=3,8\*10-3[м] – радиус контактного зазора

1. Распределение температуры в топливном блоке (в центре топливной таблетки) определяется по формуле:

Где *Rλf* – термическое сопротивление теплопроводности топливного блока (м\*K/Вт), определяемое соотношением

Где λf=0,37[Вт/(м\*K)] – коэффициент теплопроводности топлива (UO2)

На рисунке 2.1 представлены графические зависимости полученных распределений



Рисунок 2.1. Распределение температур теплоносителя, оболочки ТВЭЛа, контактного зазора, топлива и температуры в центре топливного блока по высоте

# 2. Нейтронно-физический расчёт

# 2.1 Расчет ядерных плотностей веществ

Ядерные и молекулярные плотности определяются по формуле

где *NA* – число Авогадро (моль-1), *γi* – плотность *i*-го элемента (г/см3), *Mi* – молярная масса *i*-го элемента (г/моль).

Концентрация ядер U235 и U238 с учетом обогащения β=0,04 составляет:

С учётом того, что топливо содержит отверстие посередине, его эффективная плотность будет ниже. Получим следующие значения.

Таблица 2.

Ядерная плотность топлива

|  |  |
| --- | --- |
| Вещество | Атом |
| UO2 | U235 | U238 | O |
| 2,262\*1022 | 9,049\*1020 | 2,172\*1022 | 4,525\*1022 |

Таблица 3.

Ядерная плотность замедлителя

|  |  |
| --- | --- |
| Вещество | Атом |
| H2O | H | O |
| 3,346\*1022 | 6,691\*1022 | 3,346\*1022 |

Таблица 4.

Ядерная плотность оболочки

|  |
| --- |
| Атом |
| Zr | Nb |
| 3,833\*1022 | 1,503\*1020 |

# 2.2 Расчёт макроскопических сечений

В проекте используется схема четырёх группового приближения. Нейтроны всех энергий делятся на группы следующим образом:

I группа: (10 – 0.821) МэВ, ∆U = 2.5;

II группа: (821 – 5.53) кэВ, ∆U = 5.0;

III группа: (5530 – 0.625) эВ, ∆U = 9.088;

IV группа: (0.625 – 0) эВ, ∆U = ∞

Доля нейтронов деления, попадающих в i-ую группу:

χ(1) = 0.752; χ(2) = 0.248; χ(3) = 0; χ(4) = 0;

Расчёт макроскопических сечений производится по известным ядерным плотностям элементов и четырёхгрупповым микросечениям по формуле:

 

Где k – номер энергетической группы, индекс p – характеризует тип взаимодействия (полное -t, радиационного захвата -c, деления -f, транспортное -tr, поглощения -a, неупругого рассеяния –in, упругого рассеяния – e). Суммирование производится по всем элементам j зоны.

Таблица 5.

Макросечения в 4-групповом приближении для топлива

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Группа | Σt | Σf | Σc | Σin | Σe | Σз | ν.Σ |
| I | 0.259 | 0.012 | 0.003677 | 0.052 | 0.191 | 0.003751 | 2.91 |
| II | 0.441 | 0.001915 | 0.007704 | 0.012 | 0.419 | 0.005335 | 2.444 |
| III | 1.45 | 0.021 | 0.66 | 0 | 0.768 | 0.002745 | 2.42 |
| IV | 1.056 | 0.527 | 0.15 | 0 | 0.379 | 0 | 2.42 |

Таблица 6.

Макросечения в 4-групповом приближении для замедлителя

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Группа | Σt | Σf | Σc | Σin | Σe | Σз | ν.Σ |
| I | 0.241 | 0 | 0.001917 | 0.001 | 0.238 | 0.068 | 0 |
| II | 0.971 | 0 | 0 | 0 | 0.971 | 0.195 | 0 |
| III | 1.472 | 0 | 0.0007472 | 0 | 1.471 | 0.147 | 0 |
| IV | 1.506 | 0 | 0.022 | 0 | 1.484 | 0 | 0 |

Таблица 7.

Макросечения в 4-групповом приближении для оболочки ТВЭл

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Группа | Σt | Σf | Σc | Σin | Σe | Σз | ν.Σ |
| I | 0.19 | 0 | 0.00026 | 0.001 | 0.148 | 0.00069 | 0 |
| II | 0.326 | 0 | 0.0007746 | 4.791\*10^-6 | 0.325 | 0.00148 | 0 |
| III | 0.269 | 0 | 0.005 | 0 | 0.264 | 0.00062 | 0 |
| IV | 0.248 | 0 | 0.007532 | 0 | 0.24 | 0 | 0 |

# 2.3 Расчёт коэффициента размножения бесконечного реактора по методу четырёх сомножителей.

# 2.3.1 Коэффициент размножения на быстрых нейтронах

Переходя к тесной решетке и обозначив принадлежность всех констант к первой группе, запишем основную формулу.



Здесь параметр Q00 – вероятность для нейтронов, родившихся в топливе (зона 0), испытать столкновение в топливе после любого (включая нулевое) числа отражений от ее границ.

 Конечно, нейтроны не отражаются от границ ячейки, но поскольку мы предполагаем бесконечную среду с изотропным потоком нейтронов, то вылетевшему из ячейки нейтрону мы ставим в соответствие новый, влетевший с той же скоростью.

Используя следующие формулы, мы сводим расчёт к известным нам геометрическим характеристикам ячейки ТВЭЛ и макросечениям.







Где  - средняя хорда i-ой зоны,  - поправка

Получился следующий результат:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Состояние реактора |  «Холодный» | «Горячий» |
| Коэффициент μ | 1.048 |  |

# 2.3.2 Вероятность избежать резонансного поглощения

В реакторах на тепловых нейтронах из общего числа нейтронов, поглощённых в процессе замедления, подавляющая часть поглощается на резонансах U8

В реакторах ВВЭР замедляющая способность практически полностью определяется водой и её объёмом, в соответствии с этим расчётная формула для определения вероятности избежать резонансного поглощения принимает вид:

,

Где N0 – ядерная плотность U8 (резонансный поглотитель). Здесь и далее нижний индекс означает зону ячейки (0 – топливо, 1 – замедлитель, 2 – оболочка) , имеет смысл асимптотического значения потока нейтронов в шкале летаргии. А для эффективного резонансного интеграла используется следующая эмпирическая формула

,

где γр - коэффициент затемнения в решётке, вычисляется при значении постоянной Бэлла для третьей энергетической группы =1.27; F - площадь поверхности топливного блока в см2; М8 - масса поглотителя U8 в граммах; Σm - макроскопическое сечение рассеивателя - i, содержащегося в топливном блоке (для UO2 - кислород, уран 235), которое определяется выражением

,

где σpo - микроскопическое сечение потенциального рассеяния i-го лёгкого компонента в топливе для третьей группы находится по справочнику; Ni - ядерная плотность этого компонента; λi - эффективность i-го рассеивателя.

Для «горячего» реактора значение резонансного интеграла пришлось корректировать с учётом Доплер-эффекта по формуле

,

где коэффициент β зависит от типа и состава топлива, а также от отношения F/M8:

,



Резонансное поглощение нейтронов определяется как температурой на поверхности блока Тf, так и температурой на его оси Тmax. Однако основным фактором, определяющим Доплер-эффект, является поверхностное поглощение, которое зависит от Тf. В этой связи предложена следующая формула для расчёта эффективной температуры топлива Т



где  усреднённые по высоте температуры топлива на его поверхности и в центре.

Получился следующий результат:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Состояние реактора |  «Холодный» | «Горячий» |
| Коэффициент φ8 |  |  |

#  2.3.3 Коэффициент использования тепловых нейтронов

В расчёте этого коэффициента мы использовали сечения только тепловой группы.

В трёхзонной ячейке коэффициент использования тепловых нейтронов определяется выражением



Здесь V0, V1, V2 - геометрические сечения в ячейке соответственно топлива, замедлителя и оболочки, приходящиеся на единицу высоты. Они легко находятся из известных геометрических характеристик ТВС

 - эффективные сечения поглощения, которые представляют собой усреднённые по спектру сечения поглощения, для j зоны



Поскольку получается так, что значение  зависит от потоков, а формулы для расчёта потоков включают в себя , применим следующую тактику: Зададим начальное приближение для потоков по зонам, приняв их одинаковыми



И начальное значение среднего по ячейке сечения поглощения



А затем запустим цикл, в котором будем переопределять эти значения до тех пор, пока значения текущей итерации не будут отличаться от значений прошлой итерации меньше чем на 0.1 %

Отношения потоков в зонах пересчитываются по следующим формулам





В которых





Методическое пособие содержит формулы, которые сводят коэффициенты из этих формул к сечениям и геометрическим размерам ТВЭЛ.

Пересчёт среднего макросечения поглощения производим по формуле



Получился следующий результат:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Состояние реактора |  «Холодный» | «Горячий» |
| Коэффициент Θ |  |  |

# 2.3.4 Число вторичных нейтронов деления на один поглощённый топливом нейтрон

При рассмотрении жизненного цикла нейтронов вводится величина , которая по определению равна числу вторичных нейтронов деления на один поглощённый топливом тепловой нейтрон:



Для топлива, состоящего из смеси изотопов урана, можно представить в виде:



где ,  - факторы Весткотта для поглощения и деления, которые зависят от температуры нейтронного газа. Они нужны нам поскольку сечения «f», «a» изотопа U235 не подчиняются простой зависимости 1/u от скорости нейтронов. Для вычисления мы использовали следующие эмпирические формулы.





А саму температуру нейтронного газа наша программа посчитала ещё для коэффициента Θ

,

Где γ – функция плотности теплоносителя, = 3 для ВВЭР

Получился следующий результат:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Состояние реактора |  «Холодный» | «Горячий» |
| Коэффициент  |  |  |

# 2.4 Расчёт гомогенизированных четырёхгрупповых макроконстант.

В нашей программе мы реализовали гомогенизацию следующим образом:

Сперва мы скорректировали  для второй энергетической группы.



где d0 - диаметр топливного блока (см); коэффициенты А и В для топлива из UO2 равны соответственно: А =2.40; В =136900.

Затем нашли отношения потоков и обьёмов в зонах для первых двух энергетических групп





#  3. Расчет кампании ректора ВВЭР-440

# 3.1. Изменение концентрации топливных компонент в реакторе

Во время работы в реакторе непрерывно протекают процессы, приводящие к изменению нуклидного состава.

Система дифференциальных уравнений изменения во времени ядерных плотностей компонентов реактора имеет вид:



где -начальное значение ядерной плотности ; величина в секундах.

Расчёт временных зависимостей ядерных плотностей возможен, если известна зависимость потока нейтронов во времени. Если считать неизменной во времени мощность  реактора, то значение  в любой момент времени можно определить так:

,

где - тепловая мощность реактора, Вт;  - объём топлива в активной зоне реактора, см3.



Рисунок 3.1. Поток нейтронов

Задавая различные интервалы времени и подставляя значения микроконстант в уравнениях можно построить зависимость изменения ядерных плотностей рассматриваемых изотопов как функции времени.



Рисунок 3.2. Изменение ядерной концентрации U-235



Рисунок 3.3. Накопление Pu-239



Рисунок 3.4. Накопление Pu-240



Рисунок 3.5. Накопление Pu-241

# 3.2. Отравление реактора

Отравление реактора практически полностью определяется ядрами  и .

, где , барн

, где *ωSm*=0.013,  барн



Рисунок 3.6. Изменение ядерной концентрации Xe



Рисунок 3.7. Изменение ядерной концентрации Sm

# 3.3. Шлакование реактора

Объединим шлаки в одну группу и будем оперировать суммарной ядерной плотностью. Пусть шлаки возникают лишь при делении  и , а также при радиационном захвате нейтронов , то есть отнесём к шлакам и .

Если считать, что масса шлаков  равна массе выгоревшего топлива, то выделение энергии  будет соответствовать образованию  шлаков, тогда при работе реактора тепловой мощностью в течении времени (сутки) масса выгоревшего топлива в граммах будет равна:

 .

Зная массу шлаков для топлива на основе , можно определить их ядерную плотность

 ,

где  объём топлива в реакторе, в см3.



Рисунок 3.8. Накопление шлаков

# 3.4. Расчет кампании реактора

Пусть коэффициент размножения бесконечного реактора определяется формулой четырёх сомножителей. Если предположить, что практически остаётся постоянной, то в процессе работы реактора будут изменяться только коэффициент использования тепловых нейтронов . Эффективное число вторичных нейтронов на один поглощённый топливом первичный тепловой нейтрон  , коэффициент размножения на быстрых нейтронах  и вероятность избежать резонансного поглощения  будем считать постоянными. Тогда  как функция времени может быть записана в следующем виде:

.

Последовательность расчёта  заключается в том, что для фиксированных моментов времени определяется изотопный состав и коэффициент размножения. По результатам строится график , где соответствует началу кампании, а - концу кампании . Для больших реакторов  определяется из условия , то есть

 .



Рисунок 3.9. Изменение коэффициента размножения бесконечного реактора

 *K∞необх*=1,017, что соответствует *T*=490 суток.

# 3.5. Воспроизводство делящегося материала

Для реакторов на тепловых нейтронах коэффициент воспроизводства можно определить



где первое слагаемое в правой части учитывает образование  благодаря радиационному захвату тепловых нейтронов ядрами , второе - резонансных нейтронов, а третье - убыль  вследствие поглощения тепловых нейтронов. Для таких реакторов  и значения его тем больше, чем меньше обогащение урана и чем больше скорость радиационного захвата нейтронов ядрами .

В результате расчета *КВ*=0,647

# 3.6. Расчет органов управления реактора

Из нейтронно-физического расчёта известны значения эффективных коэффициентов размножения реактора для различных температур. Максимальный избыток реактивности  должен быть скомпенсирован регулирующими стержнями. Кроме того, необходимость перевода реактора в подкритическое состояние требует реализации значения Кэф0≈ 0.99. Эффективность стержней СУЗ ΔКэфст должна быть таковой, чтобы скомпенсировать избыточный запас реактивности и перевод реактора в подкритическое состояние

ΔКэфст = Кэфмакс - Кэф0=1,296-0,99=0,306

Первая задача решается просто в случае, если в стержне поглощаются все попадающие в него нейтроны (абсолютно чёрное тело). Выражение для Rстэф имеет вид

 ,

где Rст - геометрический радиус стержня;  - гомогенизированное транспортное сечение материалов активной зоны в тепловой группе;  - безразмерная длина экстраполяции, которая определяется из выражения:

.

|  |  |
| --- | --- |
| Параметр | Значение |
| Геометрический радиус стержня, см | 7,61 |
| Гомогенизированное транспортное сечение материалов а. з. в тепловой группе, см-1 | 0,701 |
|  | 5,335 |
| F | 0,124 |
| Безразмерная длина экстраполяции | 0,672 |
| Эффективный радиус стержня | 6,71 |
| Эффективность стержня  | -0,00393 |
| Коэффициент использования тепловых нейтронов, поглощенных в регулирующем стержне | 0,236 |
| Радиус гомогенизированной среды реактора, приходящийся на один стержень, см | 34,0 |
| Число стержней | 18 |