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

Физико-технологический институт

Кафедра физики высокоэнергетических процессов

РАСЧЁТ ТЕПЛОВЫХ, ГИДРАВЛИЧЕСКИХ И НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РЕАКТОРА РБМК-1000 ПРИ ШТАТНОЙ РАБОТЕ ВСЕХ СИСТЕМ

КУРСОВОЙ ПРОЕКТ
ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Преподаватель Александров О. Е.

Студент Сабанин К.А.

Группа ФтМ-221401

Екатеринбург

 2024

Список сокращений

АЗ – активная зона.

ТВС – тепловыделяющая сборка.

ТВЭЛ – тепловыделяющий элемент.

ГПК – границы поверхностного кипения.

ГОК – граница объемного кипения.

БК – участок без кипения.

ПК – поверхностное кипение.

ОК – объемное кипение.

МС – местное сопротивление.

[**I.** **ВВЕДЕНИЕ** 4](#_Toc156000492)

[**II. ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ** 7](#_Toc156000493)

[**2.1 Расчёт коэффициентов неравномерности энерговыделения** 7](#_Toc156000494)

[**2.2 Распределение температуры теплоносителя по высоте активной зоны** 7](#_Toc156000495)

[**2.3. Распределение температуры наружной поверхности оболочки ТВЭЛа по высоте активной зоны** 8](#_Toc156000496)

[**2.4. Нахождение границы поверхностного кипения (ГПК) и границы объемного кипения (ГОК)** 10](#_Toc156000497)

[**2.5 Расчет паросодержания для канала** 12](#_Toc156000498)

[**2.5.1 Расчет массового паросодержания на выходе из канала** 12](#_Toc156000499)

[**2.5.2 Определение для паросодержания по длине канала итерационным методом** 13](#_Toc156000500)

[**2.6. Распределение температуры оболочки ТВЭЛа** 17](#_Toc156000501)

[**2.6.1 Участок объемного кипения** 17](#_Toc156000502)

[**2.6.2 Участок поверхностного кипения** 18](#_Toc156000503)

[**2.6.3 Распределение температуры контактного зазора** 18](#_Toc156000504)

[**2.6.4 Распределение температуры поверхности топливного блока ТВЭЛа** 19](#_Toc156000505)

[**2.6.5 Распределение температуры в центре топливной таблетки (максимальной температуры в топливном блоке)** 19](#_Toc156000506)

[**III.** **ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ** 20](#_Toc156000507)

[**3.1** **Экономайзерный участок (без кипения)** 20](#_Toc156000508)

[**3.2 Участок с поверхностным кипением** 21](#_Toc156000509)

[**3.3 Участок объемного кипения первого пучка твэлов** 22](#_Toc156000510)

[**3.4 Выход из пучка твэлов** 22](#_Toc156000511)

[**3.5 Участок между пучками твэлов** 23](#_Toc156000512)

[**3.6 Вход в пучок твэлов** 24](#_Toc156000513)

[**3.7 Участок объемного кипения второго пучка твэлов** 24](#_Toc156000514)

[**3.8 Итоговый перепад давлений** 24](#_Toc156000515)

[**IV.** **НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ** 26](#_Toc156000516)

[**ВЫВОДЫ** 27](#_Toc156000517)

Цель работы: провести расчет технологического канала РБМК-1000

1. **ВВЕДЕНИЕ**

Реактор РБМК-1000 – реактор с неперегружаемыми каналами, ТВС и технологический канал являются раздельными узлами. К установленным в реактор каналам с помощью неразъемных соединений подсоединены трубопроводы – индивидуальные тракты подвода и отвода теплоносителя.

Оболочки твэлов и трубы канала изготовлены из слабо поглощающих нейтроны циркониевых сплавов. Схема установок РБМК одноконтурная. Пароводяная смесь после активной зоны попадает по индивидуальным трубам в барабаны-сепараторы, после которых насыщенный пар направляется в турбины, а отсепарированная циркуляционная вода после ее смешения с питательной водой, поступающей в барабаны-сепараторы от турбоустановок, с помощью циркуляционных насосов подается к каналам реактора.

ТВС в РБМК состоят из двух частей – нижней и верхней, каждая содержит по 18 твэлов из таблеток спеченной двуокиси урана, заключенных в оболочку из циркониевого сплава. Расположение твэлов в ТВС с требуемым шагом обеспечивается с помощью дистанционирующих решеток. Дистанционирующая решетка состоит из 19 ячеек, в 18 из которых находятся твэлы, а центральная ячейка используется для крепления решетки к каркасу ТВС. Общий вид тепловыделяющей кассеты РБМК-1000 представлен на рисунке 1.



Рисунок 1 – Тепловыделяющая кассета РБМК-1000

Исходные данные для расчетов представлены в таблице 1.

Таблица 1. Исходные данные

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Название | Усл. обозначение | Значение | Размерность |
| Реактор в целом |
| Тепловая мощность реактора |  |  |  |
| Электрическая мощность р |  |  |  |
| число ТВС в активной зоне |  |  |  |
| Число ТВЭЛов в ТВС |  |  |  |
| Радиус активной зоны |  |  |  |
| Высота активной зоны |  |  |  |
| Диаметр ТВЭЛ |  |  |  |
| Радиус контактного зазора  |  |  |  |
| Радиус топливной таблетки |  |  |  |
| Диаметр центрального канала |  |  |  |
| Внутренний диаметр ТВС |  |  |  |
| Толщина ТВС |  |  |  |
| Шаг решетки |  |  |  |
| Шаг ТВС |  |  |  |
| Эффективная добавка для радиуса |  |  |  |
| Эффективная добавка для высоты |  |  |  |
| Температура теплоносителя |
| Средняя температура теплоносителя на входе в активную зону |  |  |  |
| Средняя температура теплоносителя на выходе из активной зоны |  |  |  |
| Средняя температура теплоносителя на входе в активную зону |  |  |  |
| Средняя температура теплоносителя на выходе из активной зоны |  |  |  |
| Расход и давление теплоносителя |
| Давление на входе в активную зону |  |  |  |
| Давление на выходе из активной зоны |  |  |  |
| Среднее давление в активной зоне |  |  |  |
| Номинальное массовое паросодержание на выходе из АЗ |  |  |  |
| Номинальная паропроизводительность |  |  |  |
| Номинальный расход |  |  |  |
| Свойства материалов |
| Плотность теплоносителя на входе в активную зону |  |  |  |
| Плотность теплоносителя на выходе из активной зоны |  |  |  |
| Теплоёмкость теплоносителя на входе в активную зону |  |  |  |
| Теплоёмкость теплоносителя на выходе из активной зоны |  |  |  |

Продолжение таблицы 1

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Теплопроводность теплоносителя при входе в активную зону |  |  |  |
| Теплопроводность теплоносителя при выходе в активной зоны |  |  |  |
| Коэффициент динамической вязкости при входе в активную зону |  |  |  |
| Коэффициент динамической вязкости при выходе из активной зоны |  |  |  |
| Коэффициент теплопроводности оболочки ТВЭЛ |  |  |  |
| Коэффициент теплопроводности контактного |  |  |  |
| Коэффициент теплопроводности топлива (UO2) |  |  |  |

Геометрические размеры активной зоны:

# **II. ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ**

## **2.1 Расчёт коэффициентов неравномерности энерговыделения**

Среднее энерговыделение по объему активной зоны:

Коэффициент неравномерности по высоте активной зоны:

Коэффициент неравномерности по радиусу однородной активной зоны:

Коэффициент неравномерности энерговыделения по объему активной зоны:

Средняя тепловая мощность канала (ТВС):

Тепловая мощность центрального канала (ТВС):

Средний массовый расход теплоносителя через канал (ТВС):

Массовый расход теплоносителя через центральный канал (ТВС):

## **2.2 Распределение температуры теплоносителя по высоте активной зоны**

Средняя теплоемкость теплоносителя в активной зоне:

Погонное энерговыделение:

Распределение температуры теплоносителя по высоте активной зоны на участке без кипения (экономайзерный участок):

Координата по высоте активной зоны, где z – центр:



Рисунок 2 - Распределение температуры теплоносителя по высоте активной зоны на участке без кипения (экономайзерный участок).

Температура теплоносителя на выходе канала больше чем температура теплоносителя на выходе из АЗ (). Для РБМК - это нормально. Ведь это расчет некипящего канала - он справедлив только для экономайзерного участка.

## **2.3. Распределение температуры наружной поверхности оболочки ТВЭЛа по высоте активной зоны**

Среднее значение коэффициента динамической вязкости:

Среднее значение теплопроводности теплоносителя:

Число Прандтля:

Среднее значение плотности теплоносителя:

Периметр смачивания:

Площадь поперечного сечения, занятая теплоносителем:

Эквивалентный гидравлический диаметр ТВЭЛ:

Число подобия Рейнольдса:

Константа для формулы расчета Nu:

Число Нуссельта, характеризующее соотношение между конвективным и молекулярным теплообменом:

Коэффициент теплоотдачи между оболочкой и теплоносителем:

Термическое сопротивление конвективного теплообмена между оболочкой ТВЭЛ и теплоносителем:

Температура оболочки:

Температура оболочки будет верной только до границы поверхностного кипения (ГПК). Это справедливо, т.к расчет справедлив только для экономайзерного участка.



Рисунок 3 – Распределение температуры оболочки ТВЭЛ. Температура оболочки справедлива только до пересечения с пунктирной линией .

## **2.4. Нахождение границы поверхностного кипения (ГПК) и границы объемного кипения (ГОК)**

ГПК – место, где температура оболочки достигает температуры насыщения. ГОК – место, где средняя температура теплоносителя достигает температуры насыщения.

Получим распределение давления и температуры насыщения вдоль канала. Среднее давление и температура насыщения при среднем давлении:

Распределение давления и температуры вдоль канала:



Рисунок 4 – Распределение давления и температура насыщения в канале

Для нахождения границы поверхностного кипения полагаем, что температура оболочки ТВЭЛ равняется температуре насыщения воды при текущем давлении в канале:

Или точнее:

Для нахождения границы объемного кипения полагаем, что средняя температура теплоносителя равна температуре насыщения воды при текущем давлении в канале:

Или точнее:



Рисунок 5 – Графическое определение границы поверхностного и объемного кипения

## **2.5 Расчет паросодержания для канала**

Расчет паросодержания производится методом последовательных приближений

### **2.5.1 Расчет массового паросодержания на выходе из канала**

Вычислим массу образовавшегося пара из закона сохранения энергии: полное энерговыделение затрачивается на нагрев воды до температуры насыщения и на дальнейшее испарение воды.

Для этого зададим расход теплоносителя :

Отсюда выразим массовый расход пара на выходе из активной зоны через все каналы :

Тогда через центральный канал:

Среднее массовое паросодержание на выходе из канала:

### **2.5.2 Определение для паросодержания по длине канала итерационным методом**

В качестве начального приближения для паросодержания выступает линейное распределение:



Рисунок 6 – график начального приближения для паросодержания

Энтальпию теплоносителя можем рассчитать по разному. На рисунке 6 представлены энтальпии: – по среднему давлению в канале, – энтальпия для паро-водяной смеси, – энтальпия с учетом распределения давления в канале.



Рисунок 7 – начальное приближение для удельной энтальпии теплоносителя

Относительная энтальпия потока:

Переоценим рассчитанное ранее значение границы объемного кипения . Теперь:

Начальное приближение для относительной энтальпии теплоносителя представлено на рисунке 7:



Рисунок 8 – начальное приближение для относительной энтальпии теплоносителя

Начальное приближение:



Рисунок 9 – начальное приближение для расходного объемного паросодержания

Коэффициент проскальзывания фаз:

где число Фруда:



Рисунок 10 – начальное приближение для коэффициента проскальзывания фаз

Истинное объемное паросодержание:



Рисунок 11 – начальное приближение для истинного объемного паросодержания

Генерация пара:



Рисунок 12 – Начальное приближение для скорости генерации пара

Скорость конденсации:



Рисунок 13 – начальное приближение для скорости конденсации пара



Рисунок 14 – начальное приближение для скорости накопления пара

Пересчитываем массовое паросодержание:

Далее мы будем пересчитывать массовое паросодержание до того момента, пока не получим значение, приближенное к реальному.

Переоценим границу объемного кипения. Ранее проведенная переоценка дала следующий результат:

Новое значение получаем из уравнения:



Рисунок 15 – график массового паросодержания

## **2.6. Распределение температуры оболочки ТВЭЛа**

Канал делится на 3 участка: экономайзерный (без кипения); участок поверхностного кипения; участок объемного кипения. Для этих трех участков коэффициенты теплоотдачи оболочки ТВЭЛ в теплоноситель различаются. Расчет экономайзерного участка проведен в пункте 2.3.

### **2.6.1 Участок объемного кипения**

Этот участок рассчитывается перед участком поверхностного, из-за того, что формулы для поверхностного кипения выражаются как поправки к формулам объемного кипения.Существует множество формул для коэффициентов теплоотдачи при объемном кипении. Будем использовать две: формулу Боришанского и Лабунцова. Формула Боришанского:

где

Формула Лабунцова:



Рисунок 16 – сравнение рассчитанных коэффициентов теплоотдачи по формулам Лабунцова и Боришанского

Из рисунка 16 видим, что рассчитанные зависимости практически совпадают.

### **2.6.2 Участок поверхностного кипения**

Используем ранее рассчитанный коэффициент теплоотдачи для объемного кипения и домножим его на поправочный коэффициент:



Рисунок 17 – коэффициент теплопередачи ТВЭЛ для кипящего канала

Температура оболочки:

где

### **2.6.3 Распределение температуры контактного зазора**

где

### **2.6.4 Распределение температуры поверхности топливного блока ТВЭЛа**

где

### **2.6.5 Распределение температуры в центре топливной таблетки (максимальной температуры в топливном блоке)**

где



Рисунок 18 – Распределение максимальной температуры в топливном блоке

Из рисунка 18 видим, что максимальная температура топливного блока превышает предельно допустимую для диоксида урана (2773 K). Это значит, что необходимо менять форму топливных таблеток.

1. **ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ**

 Надежность работы ядерного реактора зависит от условий отвода тепла от твэл и организации движения теплоносителя по активной зоне. Чтобы обеспечить для всех твэл соответствующие условия работы, нужно через каждый рабочий канал прокачивать вполне определенное количество теплоносителя. Чтобы эти требования были удовлетворены, необходимо провести гидравлический расчет реактора.

Так как цель работы – расчет технологического канала, то рассматривать будем только самый загруженный (центральный) канал, упуская остальные части контура циркуляции теплоносителя. Необходимо рассчитать гидравлические сопротивления характерных участков технологического канала и получить перепад давлений теплоносителя на выходе и входе в активную зону реактора.

ТВС делится на экономайзерный участок , участок поверхностного кипения , участок объемного кипения . Также указаны местные сопротивления: выход из пучка твэлов, участок «труба в трубе» и вход в пучок твэлов. Схема технологического канала с обозначенными характерными участками и местными сопротивлениями представлена на рисунке 19.



Рисунок 19 – схема ТВС РБМК-1000 с характерными участками. Местные сопротивления: 1) выход из пучка твэлов; 2) участок «труба в трубе»; 3) вход в пучок твэлов.

* 1. **Экономайзерный участок (без кипения)**

Вычислим плотность воды, как среднее по длине участка:

Вычислим число Рейнольдца, как среднее по длине участка:

Рассчитываем коэффициент сопротивления:

Тогда перепад давлений на участке без кипения:

## **3.2 Участок с поверхностным кипением**

Плотность водяного пара на линии насыщения:

Средняя плотность тепловыделения из формулы (c.16):

Средняя теплота парообразования:

Энтальпия:

Периметр смачивания и обогрева:

Коэффициент сопротивления:

Теперь перепад давлений на участке с поверхностным кипением:

## **3.3 Участок объемного кипения первого пучка твэлов**

Длина первого участка объемного кипения:

Среднее парообразование на этом участке:

Коэффициент сопротивления:

Теперь перепад давлений на первом участке объемного кипения:

## **3.4 Выход из пучка твэлов**

Это местное сопротивление рассмотрим как внезапное расширение

Тогда перепад давлений на выходе из пучка твэлов:

## **3.5 Участок между пучками твэлов**

Участок между пучками твэлов будем рассматривать как «труба в трубе». Его протяженность:

Площадь, занятая теплоносителем:

Смоченный периметр:

Число Рейнольдса:

Среднее паросодержание:

Коэффициент сопротивления:

Теперь перепад давлений на участке «труба в трубе»:

## **3.6 Вход в пучок твэлов**

Вход в пучок твэлов будем рассматривать как внезапное сужение

Тогда перепад давлений на входе в пучок твэлов:

## **3.7 Участок объемного кипения второго пучка твэлов**

Длина второго участка объемного кипения:

Среднее парообразование на этом участке:

Коэффициент сопротивления:

Теперь перепад давлений на первом участке объемного кипения:

## **3.8 Итоговый перепад давлений**

Складывая все рассчитанные перепады давлений, получаем общий перепад давлений для активной зоны:

Рассчитаем номинальное значение для перепада давления в активной зоне:

Рассчитанное значение перепада давлений в активной зоне на более чем 15% процентов превышает номинальное.

1. **НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ**

Нейтронно-физический расчет производится для вычисления коэффициента размножения. Коэффициент размножения позволит оценить возможность или невозможность запуска ядерного реактора. После запуска реактора его температура увеличивается – это приводит к тепловому расширению элементов конструкций и изменению сечений ядерных реакций. Поэтому расчет проводится для двух состояний реактора: холодного (во время запуска) и горячего (рабочий режим).

Реактор РБМК-1000 гетерогенный. Принцип расчета гетерогенного реактора: реальная среда гомогенизируется, т. е. заменяется гомогенной, эквивалентной исходной по нейтронно-физическим характеристикам., далее рассчитываются параметры решётки, затем определяется эффективный коэффициент размножения гомогенного реактора.

По методу четырех сомножителей, коэффициент размножения в бесконечной одномерной среде есть:

где – коэффициент размножения на быстрых нейтронах, – вероятность избежать резонансного поглощения в , – коэффициент использования тепловых нейтронов, – число вторичных нейтронов на один поглощенный топливом нейтрон.

Таблица 2 – значения в формуле четырех сомножителей

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  |  |  |
| Горячий | 1.038 | 0.864 | 0.68 | 1.662 | 1.013 |
| Холодный | 1.039 | 0.89 | 0.481 | 1.7 | 0.756 |

Для всех сомножителей, кроме значения для холодного реактора больше, чем для горячего. Из-за ошибочных значений на этом этапе расчета значение эффективного коэффициента размножения с учетом параметров активной зоны не найдено.

# **ВЫВОДЫ**

1. Проведен тепловой расчет технологического канала РБМК-1000. В результате расчета (рисунок 18) получили максимальную температуру топлива в самом нагруженном (центральном) канале больше предельно допустимой. Максимальная температура в результате расчета: . Предельно допустимая температура для двуокиси урана: .
2. Возможное решение данное проблемы: использование топливных таблеток из спеченной двуокиси урана с отверстием в центре.
3. Проведен гидравлический расчет технологического канала. В результате расчетов получаем перепад давлений на входе и на выходе из активной зоны:

 Полученное значение на превышает номинальное значение:

()

1. Полученный результат для перепада давлений означает, что при заданном расходе реальный перепад давлений будет меньше. Настроя циркуляционный насос в соответствии с полученным значением, реальный расход теплоносителя увеличится. Учитывая, что в расчете использовалось значение расхода теплоносителя меньше номинального:

то гидравлический расчет можно считать оптимальным.

1. Частично проведен нейтронно-физический расчет реактора РБМК-1000. В результате расчета получено значение эффективного коэффициента размножения нейтронов для бесконечной среды: