Содержание

[Введение](#_Toc263967146)

[Условные обозначения](#_Toc263967147)

[Принятые сокращения](#_Toc263967148)

[Задание на курсовой проект по курсу “судовое главное энергетическое оборудование. паропроизводящие установки”](#_Toc263967149)

[1. Судовая ядерная энергетическая установка ледокола](#_Toc263967150)

[1.1 Особенности судовой ядерной энергетической установки](#_Toc263967151)

[1.2 Паропроизводящая установка. Описание основных систем](#_Toc263967152)

[2. Прямоточный парогенератор](#_Toc263967153)

[2.1 Общие положения](#_Toc263967154)

[2.2 Прямой тепловой расчёт парогенератора](#_Toc263967155)

[2.3 Компоновка проточной части и расчёт скоростей сред](#_Toc263967156)

[2.4 Расчёт теплоотдачи, теплопередачи и определение площади поверхности теплообмена](#_Toc263967157)

[2.5 Конструктивное оформление парогенератора](#_Toc263967158)

[3. Тепловой и габаритный расчёт АКТИВНОЙ ЗОНЫ реактора](#_Toc263967159)

[3. Тепловой и габаритный расчёт АКТИВНОЙ ЗОНЫ реактора](#_Toc263967160)

[3.1 Общие положения](#_Toc263967161)

[3.1.1 Конструкция АЗ](#_Toc263967162)

[2.1.2 Особенности тепловых и температурных полей в АЗ](#_Toc263967163)

[2.1.3 Содержание тепловых расчётов](#_Toc263967164)

[2.1.4 Расчётная модель](#_Toc263967165)

[3.2 Проектирование АЗ и ТВС](#_Toc263967166)

[3.2.1 Определение размеров АЗ и ТВС](#_Toc263967167)

[2.3 Проверка теплотехнической надёжности активной зоны](#_Toc263967168)

[2.3.1 Расчёт максимальной температуры оболочки ТВЭЛ](#_Toc263967169)

[2.3.2 Расчёт максимальной температуры ядерного горючего](#_Toc263967170)

[2.3.3 Расчёт запаса по кризису теплообмена](#_Toc263967171)

[Список литературы](#_Toc263967172)

## Введение

Курсовой проект по дисциплине “Судовое главное энергетическое оборудование. Ядерные паропроизводящие установки" - это вид самостоятельной работы студентов специальностей 140200, выполняемой под руководством преподавателя, которая содержит расчётно-пояснительную записку на 30-35 стр. и графическую часть 3 листа формата А1.

Цель выполнения проекта:

закрепление теоретических знаний;

формирование навыков применения полученных знаний для решения прикладных задач проектирования ППУ и её элементов;

формирование навыков разработки технологических процессов монтажа, испытаний и сдачи ППУ;

подготовка к выполнению дипломного проекта;

подготовка к самостоятельной работе по избранной специальности;

развитие творческих способностей студентов.

При выполнении курсового проекта по дисциплине "СГЭО: Паропроизводящие установки" студенты применяют знания, полученные не только при изучении данного курса лекций, но и таких курсов, как "Теоретические основы судовой энергетики", "Теплообменное оборудование", "Теоретическая механика", "Сопротивление материалов" и др.

Проект выполняют в течение одного семестра в соответствии с графиком учебного процесса и защищают перед комиссией, назначенной кафедрой.

## Условные обозначения

Физические параметры

Р - давление;

T, t - температура;

V - объём (удельный);

W - скорость;

Q - тепловая мощность;

q - тепловой поток;

i - энтальпия;

G - расход;

D - паропроизводительность;

λ - коэффициент теплопроводности;

α - коэффициент теплоотдачи;

К - коэффициент теплопередачи;

R - термическое сопротивление;

μ - динамическая вязкость;

ν - кинематическая вязкость;

Re - критерий Рейнольдса;

Nu - критерий Нуссельта.

Геометрические характеристики

δ - толщина, зазор;

S - шаг;

σ - относительный шаг;

D, d - диаметр;

n - число трубок, слоёв;

F - площадь сечения;

П - периметр;

Н - площадь поверхности теплообмена;

h - высота поверхности теплообмена.

## Принятые сокращения

ПГ - парогенератор;

ТН - теплоноситель;

РТ - рабочее тело;

ЦНПК - циркуляционный насос первого контура;

ПВ - питательная вода;

КПС - конденсатно-питательная система;

СЯЭУ - судовая ядерная энергетическая установка;

АЗ - активная зона;

ВВРД - водо-водяной реактор под давлением;

ТВС - тепловыделяющая сборка;

ТВЭЛ - тепловыделяющий элемент;

РК - рабочий канал;

ЦРК - центральный рабочий канал;

ППУ - паропроизводящая установка;

СКО - система компенсации объема;

ИОФ (ИФ) - ионообменный фильтр.

## Задание на курсовой проект по курсу “судовое главное энергетическое оборудование. паропроизводящие установки”

Спроектировать корабельную (судовую) паропроизводящую установку на следующие параметры:

общая паропроизводительность D =297600 кг/с

температура перегретого пара на выходе из ПГ tпе =305 ˚С

давление перегретого пара на выходе из ПГPпе =3,3 МПа

давление ТН Pт =13,2 МПа

гидравлическое сопротивление тракта РТ

на экономайзерном участке Δ Pэк =0,145 МПа

гидравлическое сопротивление тракта РТ

на испарительном участке Δ Pисп =0,092 МПа

гидравлическое сопротивление тракта РТ

на пароперегревательном участке Δ Pпе =0,066 МПа

давление в конденсаторе Pк = 0,007 МПа

Задание выдано “ ” 200 г.

Срок защиты проекта “ ” 200 г.

Руководитель проекта: Клюшин Н.М.

Студент: Беляков А.А.

## 1. Судовая ядерная энергетическая установка ледокола

## 1.1 Особенности судовой ядерной энергетической установки

Судовой ядерной энергетической установкой называется комплекс оборудования, который на основе использования и преобразования ядерной энергии обеспечивает движение и обитаемость судна, а также выполнение всех технологических операций, обусловленных функциональным назначением судна.

Особенностью СЯЭУ является:

очень высокая энергоёмкость ядерного топлива;

возникновение мощных полей ионизирующих излучений;

накопление значительных количеств (по активности) радиоактивных отходов.

Получение ядерной энергии и её преобразование в тепловую энергию осуществляется в реакторной установке. Преобразование тепловой энергии в механическую или электрическую осуществляется в паротурбинной (ПТУ) установке, в электроэнергетической установке (ЭЭУ), в общесудовых системах и механизмах (ОССиМ). Передача энергии на движители (винты) в зависимости от назначения и условий эксплуатации судна осуществляется через гребную электрическую установку. ЭЭУ предназначена для выработки и обеспечения электроэнергией потребителей СЯЭУ и общесудовых потребителей.



*Рис.1.1 Состав судовой ЯЭУ.*

За основу принята двухконтурная пароэнергетическая установка, в состав которой входит реактор с водяным теплоносителем. Данный тип ЯЭУ является основным из применяемых на судах. Принципиальная схема такой установки приведена на рисунке 1.2



*Рис.1.2 Принципиальная схема СЯЭУ*

Основным компонентом двухконтурной пароэнергетической установки является водо-водяной реактор 1, у которого замедлителем и теплоносителем служит вода. Рабочим теплоносителем паротурбинной установки (ПТУ) является водяной пар, перегретый или насыщенный, генерируемый в парогенераторе 5. Передача тепловой энергии выделяемой в активной зоне реактора, рабочему телу осуществляется комплексом оборудования, объединяемым общим понятием первый контур ЯЭУ.

В состав первого контура помимо реактора и парогенератора входят:

циркуляционные насосы первого контура 4,трубопроводы 3,оборудование, обеспечивающее компенсацию изменения объёма теплоносителя и создания избыточного давления, состоящее из компенсаторов объёма 2 и реверсивных газовых баллонов 6,оборудование необходимое для очистки теплоносителя от возможных примесей ускоряющих коррозионное разрушение внутренних поверхностей первого контура и повышающих радиоактивность теплоносителя.

Оборудование первого контура обслуживается рядом систем, из которых особо важную роль играет система охлаждения, обычно выполняемая по двухконтурной схеме.

Радиоактивное оборудование обычно размещено под биологической защитой 7, которая снижает радиоактивность излучения до безопасного для обслуживающего персонала уровня предусмотренного нормами предельно допустимых излучений.

Водяной пар по паропроводу 11 направляется к главной турбине, где часть заключённой в ней энергии тепловой преобразуется в механическую, проводимую затем к винту. Помимо главной турбины на судне имеются другие потребители пара, главные из них - турбины судовой электростанции. Отработавший в турбине пар собирается в конденсаторе 9, и конденсат поступает в конденсатную систему 8, где очищается от примесей, а затем направляется в парогенератор.

Помимо перечисленного в состав паротурбинной установки входит многочисленное оборудование, выполняющее вспомогательные функции. Это оборудование объединено в ряд систем.

## 1.2 Паропроизводящая установка. Описание основных систем

Паропроизводящая установка (ППУ) ледокола состоит из двух идентичных автономных блоков. В каждый из них входят один реактор, четыре парогенератора (ПГ) и четыре циркуляционных насоса первого контура (ЦНПК), составляющие первый контур. Соединение реактора ПГ и гидрокамер ЦНПК выполнено при помощи коротких силовых патрубков типа “труба в трубе", так что создаётся единая жёсткая конструкция - блок.

Применение блочной компоновки позволяет иметь ряд преимуществ по сравнению с раздельным размещением оборудования ППУ применявшееся только на первых атомных судах. При блочной компоновке уменьшаются габариты ППУ и биологической защиты и масса установки в целом. Снижаются гидравлические сопротивления циркуляционного насоса в целом. Снижаются гидравлические сопротивления циркуляционного тракта первого контура, что позволяет уменьшить требуемый напор ЦН и улучшить условия для создания естественной циркуляции теплоносителя при остановке насосов. Повышается радиационная безопасность ППУ, т.к уменьшается вероятность разрыва трубопроводов большого диаметра вследствие снижения их протяжённости и числа сварных соединений. Появляется возможность собирать блок ППУ непосредственно в цехе с последующей погрузкой на судно, что улучшает условия труда сборщиков и повышает качество монтажа и контроля.

Каждый ЦНПК с соответствующим ПГ и патрубками образует отдельную петлю циркуляции. Теплоноситель - вода высокой чистоты (ВВЧ) - проходит через активную зону реактора, нагреваясь до 3200С, и по отводящим патрубкам поступает в ПГ. В ПГ теплоноситель отдаёт тепло рабочему телу и, охлаждённый, поступает в кольцевую камеру, выгороженную в корпусе реактора соответствующими перегородками, а из неё в ЦНПК. От ЦНПК теплоноситель поступает по напорным патрубкам в активную зону. При отказе ЦНПК или ПГ одной петли ЦНПК отключается (останавливается), парогенератор отсекается по первому и по второму контурам.

В ППУ применён водо-водяной реактор под давлением (ВВРД). Мощность реактора - 180 МВт. Реактор - гетерогенный, на тепловых нейтронах. Корпус реактора изготовлен из низколегированной теплостойкой стали, и представляет собой цилиндрический толстостенный сосуд, предназначенный для размещения всех основных частей реактора. Для защиты от коррозии поверхность корпуса и днище внутри реактора облицованы нержавеющей сталью. Герметичное соединение корпуса и крышки обеспечивается клиновой самоуплотняющейся прокладкой и нажимным фланцем. Для защиты корпуса реактора от излучений активной зоны применяются боковые и торцевые тепловые экраны. Подвод и отвод теплоносителя первого контура осуществляется в верхней части корпуса реактора. Такое решение позволяет снизить опасность ухода радиоактивного теплоносителя в случае крупной течи в первом контуре. В целях уменьшения гидравлического сопротивления теплоноситель в активной зоне совершает один ход.

Активная зона состоит из рабочих кассет, расположенных в узлах правильной треугольной решетки. Рабочая кассета представляет собой пучок стерженьковых тепловыделяющих элементов, заключённых в кожуховую трубу из циркониевого сплава.

Компенсация реактивности, обусловленной температурным эффектом, отравлением, а также выгоранием топлива в процессе кампании (работы), и необходимая подкритичность реактора в заглушенном состоянии осуществляется системой компенсирующих стержней (КР). Стержни изготовлены из карбида бора, который сильно поглощает тепловые нейтроны. Компенсирующие стержни расположены между рабочими кассетами и перемещаются в специальных циркониевых направляющих трубах.

Контроль температуры теплоносителя первого контура на входе и выходе активной зоны осуществляется с помощью термопар и термометров сопротивления (ТСП).

Для быстрой остановки реактора предусмотрена система аварийной защиты (АЗ). Она состоит из поглощающих стержней, объединённых в четыре независимые группы. Стержни системы АЗ вводятся в активную зону по аварийным сигналам.

Активной зоне присущи внутренние саморегулирующиеся характеристики, которые противодействуют любым тенденциям системы выйти из-под контроля. Благодаря отрицательному температурному коэффициенту реактивности, реактор может работать в режиме саморегулирования, что позволяет отказаться от автоматических регуляторов мощности реактора. Управление мощностью реактора осуществляется путём изменения расхода питательной воды в ПГ.

Парогенератор (ПГ) - прямоточного типа, с движением теплоносителя первого контура в межтрубном пространстве, рабочего тела - в трубах. Выполнен ПГ в виде вертикальной цилиндрической камеры с эллиптическим днищем. Внутри корпуса размещена трубная система, изготовленная из коррозионно-стойкого металла. С целью повышения живучести и ремонтопригодности трубная система разделена на 20 парогенерирующих секций и закреплена в крышке ПГ.

Циркуляционный насос первого контура (ЦНПК) - вертикального исполнения с “сухим” статором. Рабочее колесо насоса, гидрокамера с патрубками и приводной асинхронный двигатель размещены в общем герметичном корпусе. Смазка и охлаждение трущихся поверхностей двух опорных и одного упорного подшипников осуществляется теплоносителем, в свою очередь охлаждаемым в специальном встроенном охладителе.

При нарушении уплотнения любая из секции встроенного холодильника может быть отключена без ущерба для дальнейшей работы ЦНПК. Чтобы предотвратить разрушительное влияние коррозии на конструктивные элементы и короткозамкнутую обмотку ротора, а также защитить изоляцию обмоток статора, и ротор, и статор отделены от воды герметичными нихромовыми перегородками (рубашками).

Обмотка статора ЦНПК состоит из двух обмоток: обмоток большой скорости и обмоток малой скорости, что позволяет обеспечить надёжный двухскоростной режим работы насоса.

Нормальная работа первого контура обеспечивается рядом вспомогательных систем:

циркуляции теплоносителя первого контура;

компенсации изменения объёма и поддержания давления теплоносителя;

подпитки теплоносителем первого контура;

очистки теплоносителя;

охлаждения оборудования ППУ;

аварийной проливки активной зоны реактора;

дренажа, слива и хранения радиоактивной воды;

разрежения воздуха в реакторном помещении.

Система очистки теплоносителя первого контура предназначена для удаления из воды первого контура растворённых в ней солей, газов и механических примесей. В ППУ применена система очистки высокого давления. (СОВД). Контур очистки включен параллельно основному тракту воды первого контура, поэтому расход в нем определяется перепадом давления в точках отбора и гидравлическим сопротивлением системы очистки.

В состав системы очистки каждого блока входят: один холодильник, ионообменный фильтр (ИОФ), трубопроводы и арматура. Ионообменные смолы анионит и катионит (сорбенты) - загружены в виде смешанного слоя. Вода из реактора поступает в холодильник, где охлаждается до температуры *60оС*. Охлаждённая вода из реактора поступает в ИОФ, проходит через механические фильтры, слой ионообменных смол, подложку и второй комплект механических фильтров, предназначенных для предотвращения износа смол, и возвращается в контур.

Для контроля работоспособности смол и качества теплоносителя предусмотрены отбор проб до и после ИОФ. Ионообменные смолы стечением времени уплотняются под давлением потока, что приводит к росту гидравлического сопротивления фильтра и ухудшению обменных свойств сорбентов, поэтому сорбенты периодически взрыхляют обратным током воды.

Система расхолаживания предназначена для отвода тепла из активной зоны реактора в условиях дефицита пара и электроэнергии. Расхолаживание активной зоны возможно с использованием нескольких контуров:

второго контура;

холодильника системы очистки с циркуляцией теплоносителя при помощи ЦНПК, работающих на ОМС;

холодильника системы очистки с циркуляцией теплоносителя при помощи насоса ремонтного расхолаживания.

Три автономных канала расхолаживания обеспечивают надёжное функционирование системы при всех проектных аварийных ситуациях, включая и судовые аварии.

В режиме расхолаживания по второму контуру получаемый в ПГ пар, пароводяная смесь и горячая вода отводятся по специальному трубопроводу через дроссельный клапан и ДУУ в стояночный конденсатор. Конденсат из конденсатора забирается электроконденсатным насосом и подается в теплый ящик. Подача воды в ПГ осуществляется аварийным вспомогательным насосом по автономному от питательной основной магистрали, трубопроводу.

При расхолаживании активной зоны с использованием холодильника системы очистки отсекается ИОФ. Циркуляция теплоносителя осуществляется ЦНПК. При этом основная масса теплоносителя прокачивается через активную зону реактора, а часть его поступает в холодильник, в котором охлаждается и поступает на всас ЦНПК, где более холодный теплоноситель смешивается с горячим, за счет чего происходит снижение температуры всей массы циркулирующего теплоносителя.

При невозможности или нецелесообразности использования ЦНПК циркуляция теплоносителя в остановленном реакторе для отвода остаточного тепловыделения обеспечивается НРР. Теплоноситель первого контура забирается из реактора после прохода активной зоны, охлаждается в холодильнике системы очистки и поступает на вход активной зоны.



Рис.1.3 Принципиальная схема паропроизводящей установки

Система третьего контура предназначена для отвода тепла от оборудования первого контура при длительной работе ЯЭУ. Охлаждению подлежит: холодильники ИОФ системы очистки теплоносителя первого контура, электродвигатели ЦНПК, приводы рабочих органов системы управления и защиты, бак железоводной защиты, конструктивные элементы вторичной биологической защиты блока ППУ. Система выполнена в виде замкнутого контура, по которому циркулирует дистиллированная вода.

В состав системы одного борта входят два циркуляционных насоса. Один насос основной, другой - резервный. В контуре поддерживает небольшое избыточное давление, которое исключает кавитацию теплоносителя в циркуляционных насосах и способствует надёжному заполнению контура. Избыточное давление в контуре создаётся подключением к нему компенсационной ёмкости - цистерны. Эта цистерна служит также для компенсации изменений объема воды в результате изменения её температуры.

Тепловая энергия воспринимаемая водой третьего контура передаётся забортной воде в теплообменнике третьего-четвертого контуров.

Очистка воды контура осуществляется в ИОФ, что позволило разместить часть оборудования вне биологической защиты.

Для непрерывной циркуляции воды в контуре, кроме резервного насоса, установлены перемычки между контурами разных бортов. При необходимости вода подаётся к потребителям по безопасному трубопроводу, минуя ИОФ.

Система четвертого контура предназначена для отвода тепловой энергии от воды третьего контура, а также для охлаждения ряда вспомогательных потребителей. В системе установлено 3 циркуляционных насоса. Два насоса постоянно находятся в работе, причем каждый насос способен обеспечить полный расход воды, третий насос - резервный. Прием и отлив забортной воды производится через клапаны забортной воды - кингстоны. Приемный трубопровод снабжен фильтром, удерживающим механические примеси в забортной воде.

Система подпитки предназначена для компенсации небольших потерь теплоносителя первого контура, происходящих в результате отбора проб или нарушения его герметичности. В состав системы входят два подпиточных электронасоса объемного типа. Насосы расположены в зоне строгого режима и включаются по мере необходимости в соответствии с показаниями уровнемеров в компенсаторах объема. Подпиточная вода размещается в подпиточных баках. Вся арматура на трубопроводах рассматриваемой системы имеет дистанционное управление.

Система компенсации изменения объема теплоносителя и поддержания его давления обеспечивает поддержание заданного давления в первом контуре и компенсацию изменений объема контура и теплоносителя. В процессе разогрева и расхолаживания и в переходных режимах.

Объём теплоносителя во время работы ЯЭУ изменяется в результате изменения его температуры: при повышении температуры избыточный объём воды вытесняется из системы циркуляции, а при снижении - вновь поступает в систему.

Для выполнения своих функций система компенсации объёма теплоносителя должна содержать две группы элементов. Первая группа предназначена для компенсации изменения объёма теплоносителя, вторая - для создания необходимого избыточного давления в первом контуре ППУ и поддержания его в заданных пределах во время работы судовой ЯЭУ.

Для компенсации изменения объёма теплоносителя в ядерных ППУ применяются ёмкости - баллоны, соединённые с основным объёмом первого контура трубопроводами. Баллоны обычно называют компенсаторами объёма.

Давление теплоносителя может быть создано путём заполнения объёма над поверхностью теплоносителя в компенсаторах объёма газом, сжатым до требуемого давления. Такая система называется газовой. Необходимое давление теплоносителя может быть получено также испарением части воды, заполняющей компенсаторы объёма, и доведением давления пара до требуемого. Систему компенсации подобного типа называют паровой.

В состав группы элементов, служащих для создания и поддержания давления теплоносителя, входят баллоны с газом, связанные с компенсаторами объёма трубопроводами. В паровой системе компенсации для этой цели используют электрогрелки, размещаемые в компенсаторах объёма. Электрогрелки снабжаются аппаратурой управления нагревом и испарением теплоносителя.

В состав газовой системы компенсации изменения объёма теплоносителя входят компенсаторы объёма, в которых размещается вытесняемый из системы циркуляции в процессе расширения теплоноситель. Компенсаторы объёма соединены трубопроводом с системой циркуляции теплоносителя. При значительном объёме теплоносителя, вытесняемого в компенсатор объёма при разогреве ППУ, последний может быть разделён на несколько ёмкостей, связанных между собой трубопроводами последовательно или параллельно.

Стремление ограничить отклонение давления в первом контуре ППУ узкими пределами приводит к необходимости иметь значительный объём газа в компенсаторах объёма. Пространство над уровнем жидкости в них становится недостаточным для размещения всего газа, и приходится дополнительно подключать несколько реверсивных баллонов, заполненных газом. Для восполнения потерь газа предусматривают баллоны с запасом газа, при необходимости подключаемые к компенсаторам объёма.

К достоинствам газовой системы компенсации изменения объёма теплоносителя относятся:

постоянная готовность к действию;

отсутствие необходимости в обслуживании в процессе работы ППУ (за исключением контроля параметров, характеризующих работоспособность системы);

отсутствие необходимости в какой-либо энергии в процессе работы ППУ.

Выбор системы компенсации изменения объёма теплоносителя производят исходя из свойств системы и предъявляемых к ней требований.

В установке ледокола использована газовая система компенсации объема и поддержания давления. В состав системы входят компенсаторы объема (КО), в которых размещается вытесняемый из системы циркуляции в процессе расширения теплоноситель. Компенсатор объема - это ёмкость высокого давления. В верхней части КО имеются патрубки для ввода теплоносителя и газа, уровнемер, и предохранитель клапанов. Компенсаторы объема соединены трубопроводом с системой циркуляции теплоносителя. Давление теплоносителя создаётся путем заполнения объема над поверхностью теплоносителя газом, сжатым до требуемого давления. Для этого к системе подключено 2 группы ресиверных баллонов с запасом газа.

Для аварийного охлаждения активной зоны реактора в случае разгерметизации первого контура предусмотрена система аварийной проливки реактора. В состав системы входят 3 проливочных насоса объемного типа, трубопроводы и арматура. По сигналу падения давления в первом контуре в действие вводятся основные проливочные насосы. Они принимают воду из цистерн запаса питательной воды и подают её в первый контур по двум автономным магистралям. В случае отказа одного из основных насосов автоматически включается резервный насос.

Система вентиляции обеспечивает удаление радиоактивных газов и аэрозолей и поддержание необходимой температуры и влажности, а также некоторого разрежения в помещениях реакторного отсека. Система делится на две автономные группы (подсистемы) по обслуживаемым помещениям. Подсистема вентиляции реакторного и аппаратного помещений обеспечивает вентиляцию по открытому и замкнутому циклам. Вторая подсистема обслуживает прочие помещения ядерной ППУ и работает только по открытому циклу. При работе системы по открытому циклу выброс воздуха производится в полую грот-мачту. Воздух, удаляемый из реакторного помещения, перед выбросом в атмосферу при необходимости проходит очистку в противоаэрозольных фильтрах тонкой очистки.

## 2. Прямоточный парогенератор

## 2.1 Общие положения

1.1.1 Схема парогенератора

Общая схема парогенератора изображена на рисунке 1.1 Движение теплоносителя (среда первого контура) и рабочего тела (среда второго контура) - принудительное и осуществляется с помощью циркуляционного насоса первого контура (ЦНПК) - по тракту теплоносителя и питательного насоса (ПН) - по тракту рабочего тела.

Т.Н.

Т.Н.

Р.Т.

Р.Т.

Нпг

Рис.1.1. Общая схема парогенератора

Схема движения сред - противоточная. Название “прямоточный ПГ” означает, что у него отсутствует внутренний контур циркуляции. Тракты прямоточного парогенератора приведены на рисунке 1.2 В тракте ТН происходит его охлаждение от до  без фазового перехода. Рабочее тело сначала нагревается от температуры питательной воды (tПВ) до температуры насыщения (ts); эта часть ПГ называется экономайзерным участком и имеет поверхность теплообмена НЭК. Затем на испарительном участке (НИСП) имеет место объёмное кипение до полного перехода жидкости в пар, т.е. достижения сухости Х=1. Далее сухой насыщенный пар перегревается на пароперегревательном участке (НПЕ) до температуры tПЕ.

Рабочей поверхностью ПГ является поверхность теплообмена, через которую происходит “организованный" теплообмен. Её окружают конструктивные элементы: патрубки, смесительные камеры, коллектора и т.п.

1.1.2 Цель теплового расчёта - определение площади поверхности теплообмена (НПГ) и её габаритов (например, высоты и диаметра, если она цилиндрическая).

1.1.3 Расчётная модель.

В данном расчёте принята упрощённая модель прямоточного ПГ, которая имеет следующие основные характеристики:

1. Охлаждение однофазного ТН (воды) невелико - 40÷60˚С, распределение температуры его вдоль тракта практически линейное. В расчёте принимается линейное распределение температуры вдоль тракта.

2. Границы между участками в тракте РТ - резкие. Распределения температур на экономайзере и перегревателе - линейные.

3. Температура насыщения на испарительном участке принята постоянной, соответствующей среднему давлению на испарительном участке.

4. Распределение давления вдоль тракта РТ - линейное. Изменение давления вдоль тракта ТН не учитывается.

tпе

tтвх.эк

tтвх.исп

tтвых.пг

Hэк

Hисп

Hпе

Pт,Gт

tтвх.пг

tпв

Рис.1.2. Тракты прямоточного ПГ

5. Потери тепла на участках оцениваются в тепловых балансах одинаковыми коэффициентами, т.е.  - const, где Q*уч* - тепло, воспринятое на участке рабочим телом; Qтуч - тепло, отданное на этом участке теплоносителем.

6. Физические параметры сред на участках определены по средним для этих участков температурам и давлениям.

7. При подсчёте коэффициентов теплоотдачи симплекс: 

8. Условия теплоотдачи вдоль всего испарительного участка принимаются неизменными, наличие зоны ухудшенного теплообмена в конце испарителя не учитывается.

9. Теплоотдача на экономайзере и нагревателе в тракте РТ подсчитывается по средним характеристикам.

10. Коэффициенты теплоотдачи определяются по формулам для плоской стенки, т.к во всех случаях 

11. Количество тепла, которым обмениваются ТН и РТ определяется по уравнениям первого начала термодинамики для изобарного процесса.

12. Учёт эффективности использования поверхности теплообмена выполняется путём введения в итоговую расчётную формулу коэффициента запаса <1.

## 2.2 Прямой тепловой расчёт парогенератора

Таблица 1.2

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| № | Наименование величины | Обозначение | Размерность | Расчётная формула | Числовое  значение |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 1 | Среднее давление на пароперегревательном участке в тракте РТ |  | МПа | Pпе+0,5ΔPпе | 3.33 |
| 2 | Среднее давление на испарительном участке в тракте РТ |  | МПа | Pпе+ΔPпе+0,5ΔPисп | 3.41 |
| 3 | Среднее давление на экономайзерном участке в тракте РТ |  | МПа | Pпе+ΔPПЕ+ΔPИСП+0,5ΔPЭК | 3.53 |
| 4 | Давление питательной воды | РПВ | МПа | PПЕ+ΔPПГ | 3.6 |
| 5 | Средняя температура на испарительном участке в тракте РТ |  | ˚С | f () - справ. данное, [8] | 241.07 |
| 6 | Удельный объём кипящей воды на испарительном участке в тракте РТ |  | м3/кг | справ. данное, [8] | 0.0012318 |
| 7 | Температура питательной воды | tПВ | ˚С | f (Pк) - справ. данное, [8] | 39 |
| 8 | Энтальпия кипящей воды |  | кДж/кг | f () - справ. данное, [8] | 1042.6 |
| 9 | Энтальпия сухого насыщенного пара |  | кДж/кг | f () - справ. данное, [8] | 2802.9 |
| 10 | Энтальпия перегретого пара | iПЕ | кДж/кг | f (PПЕ; tПЕ) - справ. данное, [8] | 2997.9 |
| 11 | Энтальпия питательной воды | iПВ | кДж/кг | f (PПВ; tПВ) - справ. данное, [8] | 166.6 |
| 12 | Паропроизводительность одной секции ПГ | D | кг/с |  | 10.33 |
| 13 | Тепловая мощность, передаваемая РТ на экономайзерном участке |  | кВт | D∙ (i’ - iПВ) | 9.05×103 |
| 14 | Тепловая мощность, передаваемая РТ на испарительном участке |  | кВт |  | 1.82×104 |
| 15 | Тепловая мощность, передаваемая РТ на пароперегревательном участке |  | кВт |  | 2.01×103 |
| 16 | Тепловая мощность, передаваемая РТ в ПГ |  | кВт | QЭК+QИСП+QПЕ | 2.93×104 |
| 17 | Тепловая мощность, отдаваемая ТН на экономайзерном участке |  | кВт |  | 9.24×103 |
| 18 | Тепловая мощность, отдаваемая ТН на испарительном участке |  | кВт |  | 1.86×104 |
| 19 | Тепловая мощность, отдаваемая ТН на пароперегревательном участке |  | кВт |  | 2.06×103 |
| 20 | Тепловая мощность, отдаваемая ТН в ПГ |  | кВт |  | 2.98×104 |
| 21 | Температура насыщения ТН | ts | ˚С | f (Pт) - справ. данное, [8] | 332 |
| 22 | Температура ТН на выходе из реактора |  | ˚С | ts-Δtнт | 312 |
| 23 | Температура ТН на входе в ПГ |  | ˚С |  | 312 |
| 24 | Температура ТН на выходе из ПГ |  | ˚С |  | 262 |
| 25 | Энтальпия ТН на входе в ПГ |  | кДж/кг | f (Pт; ) - справ. данное, [8] | 1408.5 |
| 26 | Энтальпия ТН на выходе из ПГ |  | кДж/кг | f (Pт; ) - справ. данное, [8] | 1143.6 |
| 27 | Расход ТН через ПГ |  | кг/с |  | 113 |
| 28 | Разность энтальпий ТН на границах пароперегревательного участка |  | кДж/кг |  | 18.251 |
| 29 | Разность энтальпий ТН на границах испарительного участка |  | кДж/кг |  | 164.758 |
| 30 | Энтальпия ТН на входе в испарительный участок |  | кДж/кг | - | 1391 |
| 31 | Энтальпия ТН на входе в экономайзерный участок |  | кДж/кг | - | 1226 |
| 32 | Температура ТН на входе в испарительный участок |  | ˚С | f (; Pт) - справ. данное, [8] | 309 |
| 33 | Температура ТН на входе в экономайзерный участок |  | ˚С | f (; Pт) - справ. данное, [8] | 278.54 |
| 34 | Экономайзерный участок: |  |  |  |  |
| - | больший температурный напор |  | ˚С | - tПВ | 223 |
| - | меньший температурный напор |  | ˚С | - | 37.5 |
| - | средний температурный напор |  | ˚С |  | 104 |
| 35 | Испарительный участок: |  |  |  |  |
| - | больший температурный напор |  | ˚С | - | 67.93 |
| - | меньший температурный напор |  | ˚С | - | 37.5 |
| - | Средний температурный напор |  | ˚С |  | 51.2 |
| 36 | Пароперегревательный участок: |  |  |  |  |
| - | больший температурный напор |  | ˚С | - | 67.9 |
| - | меньший температурный напор |  | ˚С | -tПЕ | 7 |
| - | средний температурный напор |  | ˚С |  | 26.9 |
| 37 | Физические параметры сред на участках: |  |  |  |  |
| 37.1 | Экономайзерный участок: |  |  |  |  |
| 37.1.1 | Тракт ТН: |  |  |  |  |
| - | средняя температура |  | ˚С | 0,5 (+) | 270.3 |
| - | теплопроводность |  |  | справ. данное, [8] | 603.49 |
| - | удельный объём |  | м3/кг | справ. данное, [8] | 1.29×10-3 |
| - | число Прандтля |  | - | справ. данное, [8] | 0.8221 |
| - | динамическая вязкость |  | мкПа∙с | справ. данное, [8] | 99.7 |
| - | кинематическая вязкость |  | м2/с | ∙ | 1.29×10-7 |
| 37.1.2 | Тракт РТ: |  |  |  |  |
| - | средняя температура |  | ˚С | - | 166.26 |
| - | теплопроводность |  |  | справ. данное, [8] | 682.02 |
| - | удельный объём |  | м3/кг | справ. данное, [8] | 1.11×10-3 |
| - | число Прандтля |  | - | справ. данное, [8] | 1.046 |
| - | динамическая вязкость |  | мкПа∙с | справ. данное, [8] | 164.1 |
| - | кинематическая вязкость |  | м2/с | ∙ | 1.82×10-7 |
| 37.2 | Испарительный участок: |  |  |  |  |
| 37.2.1 | Тракт ТН: |  |  |  |  |
| - | средняя температура |  | ˚С | + | 292.27 |
| - | теплопроводность |  |  | справ. данное, [8] | 569.09 |
| - | удельный объём |  | м3/кг | справ. данное, [8] | 1.36×10-3 |
| - | число Прандтля |  | - | справ. данное, [8] | 0.854 |
| - | динамическая вязкость |  | мкПа∙с | справ. данное, [8] | 90.762 |
| - | кинематическая вязкость |  | м2/с | ∙ | 1.23×10-7 |
| 37.3 | Пароперегревательный участок: |  |  |  |  |
| 37.3.1 | Тракт ТН: |  |  |  |  |
| - | средняя температура |  | ˚С | 0,5 (+) | 310.5 |
| - | теплопроводность |  |  | справ. данное, [8] | 533.85 |
| - | удельный объём |  | м3/кг | справ. данное, [8] | 1.43×10-3 |
| - | число Прандтля |  | - | справ. данное, [8] | 0.9201 |
| - | динамическая вязкость |  | мкПа∙с | справ. данное, [8] | 83.417 |
| - | кинематическая вязкость |  | м2/с | ∙ | 1.193×10-7 |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 37.3.2 | Тракт РТ: |  |  |  |  |
| - | средняя температура |  | ˚С | - | 283.65 |
| - | теплопроводность |  |  | справ. данное, [8] | 47.66 |
| - | удельный объём |  | м3/кг | справ. данное, [8] | 6.93×10-2 |
| - | число Прандтля |  | - | справ. данное, [8] | 1.113 |
| - | динамическая вязкость |  | мкПа∙с | справ. данное, [8] | 19.2 |
| - | кинематическая вязкость |  | м2/с | ∙ | 1.33×10-6 |

Примечание к 1.2

п.12 - При общей паропроизводительности Dобщ ≥ 30 кг/с, принимаем n ппу =2; при Dобщ < 30 кг/с, n ппу =1.

п.12 - Количество ПГ в ППУ обычно составляет n пг = 2÷5.

п.22 - Величина недогрева Δtнт принимаетсяв интервале 10÷50 ˚С. (принято 20˚С)

п.24 - Охлаждение теплоносителя Δt принимается 40÷60 ˚С. (принято 50˚С)

100

200

300

t,°C

tтвх.пг

tтвх.исп

tтвх.эк

tтвых.пг

hэк

hисп

hпе

1

2

h,м

0

tпв

tпе

Рис.1.3. Качественный график распределения температур в парогенераторе (по трактам ТН и РТ)

Параметры: tтвых. пг = 262.05˚С

tтвх. эк = 278.54˚С

tтвх. исп = 309˚С

tтвх. пг = 312.05˚С

tпв = 39 ˚С

tпе = 305˚С

hэк = 0.458 м

hисп = 1.698 м

hпе = 0.326 м

Нпг = 90.598 м

## 2.3 Компоновка проточной части и расчёт скоростей сред

Таблица 1.3

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| № | Наименование величины | Обозначение | Размерность | Расчётная формула | Числовое значение |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 1 | Внутренний диаметр трубок | dвн | м | принято, [1] | 0.015 |
| 2 | Толщина стенок труб | δст | м | принято, [1] | 0.002 |
| 3 | Горизонтальный зазор между соседними трубками | δгор | м | принято, [1] | 0.003 |
| 4 | Вертикальный зазор между соседними трубками | δверт | м | принято, [1] | 0.003 |
| 5 | Скорость рабочего тела на экономайзерном участке | Wэк | м/с | принято, [1] | 3 |
| 6 | Число трубок в первом слое | n1 | шт | принято, [1] | 1 |
| 7 | Наружный диаметр трубок | dнар | м | dвн+2δст | 0.019 |
| 8 | Средний диаметр трубок | dср | м | dнар-δст | 0.017 |
| 9 | Диаметр центрального вытеснителя | Dцв | м | (10÷12) dнар | 0.19 |
| 10 | Общее число трубок | nтр | шт |  | 22 |
| 11 | Шаг между смежными трубками в слое навивки | S1 | м | dнар+δверт | 0.022 |
| 12 | Шаг между слоями навивки | S2 | м | dнар+δгор | 0.022 |
| 13 | Относительный поперечный шаг трубок |  | - |  | 1.16 |
| 14 | Относительный продольный шаг трубок |  | - |  | 1.16 |
| 15 | Диаметр первого слоя трубок | D1 | м | Dцв+dнар+2δгор | 0.215 |
|  | Диаметры последующих слоёв трубок | Di | м | Di-1+2dнар+2δгор | --- |
| 16 | Наружный диаметр проточной части | DПГ | м |  | 0.68 |
| 17 | Средний диаметр проточной части | Dср | м |  | 0.435 |
| 18 | Число трубок в последующих слоях навивки | ni | шт |  | ---- |
| 19 | Принятое число трубок |  | шт | См. примечание к табл.1.3 | 22 |
| 20 | Число слоёв навивки | Z | - | См. примечание к табл.1.3 | 11 |
| 21 | Площадь проходного сечения межтрубного пространства |  | м2 | π∙ Dср∙Z∙ δгор | 0.045 |
| 22 | Действительная скорость РТ на экономайзерном участке |  | м/с |  | 2.95 |
| 23 | Скорость РТ на пароперегревательном участке |  | м/с |  | 184.2 |
| 24 | Скорость ТН на экономайзерном участке |  | м/с |  | 3.22 |
| 25 | Скорость ТН на испарительном участке |  | м/с |  | 3.39 |
| 26 | Скорость ТН на пароперегревательном участке |  | м/с |  | 3.57 |

Примечание к 1.3

Основным требованием к поверхности, составленной из ряда параллельно включенных труб, является примерное равенство их длин. В этом случае у них примерно одинаковые гидравлические сопротивления, а следовательно, одинаковые расходы и температуры.

На основании п. п.15,18 заполняем табл.1.3.1, пока Σni максимально приблизится к nтр, эта величина составит .

Таблица .3.1. Определение числа труб и слоев проточной части ПГ

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| № i-го слоя | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Di, м | 0.215 | 0.259 | 0.303 | 0.347 | 0.391 | 0.435 | 0.479 | 0.523 | 0.567 |
| ni, шт | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 |
| Σni=ni+ni-1, шт | 1 | 2 | 3 | 5 | 7 | 9 | 11 | 13 | 16 |

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| № i-го слоя | 10 | 11 |
| Di, м | 0.611 | 0.655 |
| ni, шт | 3 | 3 |
| Σni=ni+ni-1, шт | 19 | 22 |

δ2

δ1

δпг

S1

Dцв

D1

Di

D12

Dпг

dнар

Рис.1.4. Схема навивки змеевика парогенератора

Параметры:

Dпг = 0.68 м

Dцв = 0.19 м

D1 = 0.215 м

S1 = 0.022 м

δ1 = 0.003 м

δ2 =0.003 м

δпг = 0.003 м

## 2.4 Расчёт теплоотдачи, теплопередачи и определение площади поверхности теплообмена

Таблица 1.4

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| № | Наименование величины | Обозначение | Размерность | Расчётная формула | Числовое  значение |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 1 | Тракт теплоносителя |  |  |  |  |
| 1.2 | Число Re на экономайзерном участке |  | - |  | 476100 |
| 1.3 | Число Re на испарительном участке |  | - |  | 522900 |
| 1.4 | Число Re на пароперегревательном участке |  | - |  | 569000 |
| 1.5 | Число Nu на экономайзерном участке |  | - |  | 1102 |
| 1.6 | Число Nu на испарительном участке |  | - |  | 1208 |
| 1.7 | Число Nu на пароперегревательном участке |  | - |  | 1329 |
| 1.8 | Коэффициент теплоотдачи к стенке на экономайзерном участке |  |  |  | 35000 |
| 1.9 | Коэффициент теплоотдачи к стенке на испарительном участке |  |  |  | 36170 |
| 1.10 | Коэффициент теплоотдачи к стенке на пароперегревательном участке |  |  |  | 37330 |
| 2 | Тракт рабочего тела |  |  |  |  |
| 2.1 | Число Re на экономайзерном участке |  | - |  | 243000 |
| 2.2 | Число Re на пароперегревательном участке |  | - |  | 2077000 |
| 2.3 | Число Nu на экономайзерном участке |  | - | См. примечание к табл 1.4 | 595.26 |
| 2.4 | Число Nu на пароперегревательном участке |  | - |  | 2307 |
| 2.5 | Коэффициент теплоотдачи от стенки на экономайзерном участке |  |  |  | 27070 |
|  | поправочный коэффициент |  | - |  | 1 |
| 2.6 | Коэффициент теплоотдачи от стенки на пароперегревательном участке |  |  |  | 73300 |
| 2.7 | Коэффициент теплоотдачи от стенки на испарительном участке |  |  | методом последовательных приближений | 41230 |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 2.7 1 | Тепловой поток в первом приближении |  | Вт/м2 | См. примечание к п.1.4 | 2×105  3×105  4×105  4.5×105 |
| 2.7 2 | Коэффициент теплоотдачи |  |  |  | 3×104  3.98×104  4.87×104  5.29×104 |
| 2.7 3 | Средняя температура стенок трубок |  | ˚С |  | 269.065  265.44  262.889  261.864 |
| 2.7 4 | Коэффициент теплопроводности стенок трубок |  |  | f (), см. табл.2.7ое | 18.167  18.105  18.063  18.047 |
| 2.7 5 | Коэффициент теплопередачи |  |  |  | 5845  6126  6293  6354 |
| 2.7 6 | Тепловой поток во втором приближении |  | Вт/м2 |  | 2.992×105  3.137×105  3.222×105  3.253×105 |
| 2.7 7 | Строим график , значения из п. п.2.7 1 и 2.7 6 |  |  | см. рис.1.5 | 3.153 |
| 2.7 8 | Коэффициент теплоотдачи на испарительном участке |  |  |  | 41230 |
| 3 | Средняя температура стенок трубок на экономайзерном участке |  | ˚С |  | 224.93 |
| 4 | Средняя температура стенок трубок на испарительном участке |  | ˚С |  | 265 |
| 5 | Средняя температура стенок трубок на пароперегревательном участке |  | ˚С |  | 292.72 |
| 6 | Коэффициент теплопроводности стенок трубок на экономайзерном участке |  |  | f (), см. табл.2.7 | 17.637 |
| 7 | Коэффициент теплопроводности стенок трубок на испарительном участке |  |  | f (), см. табл.2.7 | 18.098 |
| 8 | Коэффициент теплопроводности стенок трубок на пароперегревательном участке |  |  | f (), см. табл.2.7 | 18.637 |
| 9 | Коэффициент теплопередачи на экономайзерном участке |  |  |  | 5589 |
| 10 | Коэффициент теплопередачи на испарительном участке |  |  |  | 6157 |
| 11 | Коэффициент теплопередачи на пароперегревательном участке |  |  |  | 6768 |
| 12 | Коэффициент запаса, учитывающий эффективность использования поверхности теплообмена |  | - | См. примечание к п.1.4 | 0.95 |
| 13 | Площадь поверхности теплообмена на экономайзерном участке |  | м2 |  | 16.721 |
| 14 | Площадь поверхности теплообмена на испарительном участке |  | м2 |  | 61.978 |
| 15 | Площадь поверхности теплообмена на пароперегревательном участке |  | м2 |  | 11.899 |
| 16 | Площадь поверхности теплообмена ПГ |  | м2 | НЭК+НИСП+НПЕ | 90.598 |
| 17 | Требуемая длина навиваемых петлей | lтр | м |  | 77.108 |
| 18 | Высота поверхности теплообмена ПГ на экономайзерном участке | hЭК | м |  | 0.458 |
| 19 | Высота поверхности теплообмена ПГ на испарительном участке | hИСП | м |  | 1.698 |
| 20 | Высота поверхности теплообмена ПГ на пароперегревательном участке | hПЕ | м |  | 0.326 |
| 21 | Высота поверхности теплообмена ПГ | hПГ | м |  | 2.483 |
| 22 | Отношение высоты поверхности теплообмена ПГ к наружному диаметру проточной части |  | - |  | 3.651 |
| 23 | Габаритное ограничение |  | - | 3÷4 | ЕСТЬ! |

Примечание к 1.4

п.2.3 - Число Nu на экономайзерном участке при заданных условиях

=

2. п.2.7 4 - Коэффициент теплопроводности для нержавеющей стали приведен в табл.2.7

3. п.12 - Коэффициент запаса  = 0,95÷0,98

4. п.2.7 1 - Принимается для удобства расчета 3÷5 значений в интервале 1÷5·105 Вт/м2, затем для данных значений рассчитываются п. п.2.7 2 ÷2.7 6.

5. п.23 - При невыполнении ограничения выполняется новая компоновка, и повторяют расчет теплопередачи.

2

3

4

5

4

3

2

5

qисп( q’=q” )

Рис 1.5. Построение графика функции , для нахождения .

q”

1111

q’

1111

1

1111

q1”= 299200Вт/м2

q2”= 313700Вт/м2

q3”= 322200Вт/м2

q4”= 325300Вт/м2

qисп= 315300Вт/м2

## 2.5 Конструктивное оформление парогенератора

Таблица 1.5

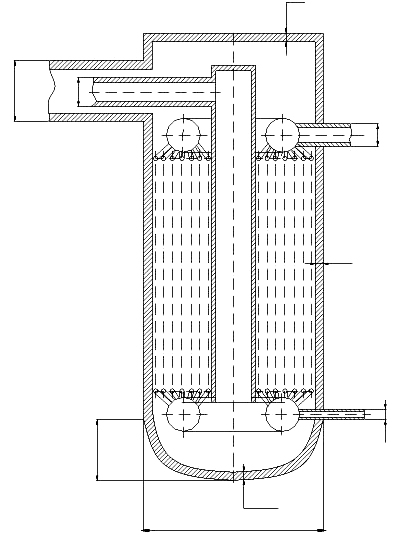
|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| № | Наименование величины | Обозначение | Размерность | Расчётная формула | Числовое  значение |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 1 | Допускаемое напряжение для выбранного материала корпуса |  | МПа | справ. данное, [11] | 113.8 |
| 2 | Внутренний диаметр патрубка входа питательной воды в ПГ |  | м |  | 2.094 |
| 3 | Номинальная толщина стенки патрубка входа ПВ в ПГ |  | м |  | 0.034 |
| 4 | Наружный диаметр патрубка входа питательной воды в ПГ |  | м | +2 | 2.162 |
| 5 | Внутренний диаметр патрубка входа перегретого пара из ПГ |  | м |  | 0.07 |
| 6 | Номинальная толщина стенки патрубка выхода перегретого пара из ПГ |  | м |  | 0.001 |
| 7 | Наружный диаметр патрубка выхода перегретого пара из ПГ |  | м | +2 | 0.143 |
| 8 | Внутренний диаметр патрубка входа ТН в ПГ |  | м |  | 0.24 |
| 9 | Номинальная толщина стенки патрубка входа ТН в ПГ |  | м |  | 0.015 |
| 10 | Наружный диаметр патрубка входа ТН в ПГ |  | м | +2 | 0.269 |
| 11 | Внутренний диаметр патрубка выхода ТН из ПГ |  | м |  | 0.36 |
| 12 | Номинальная толщина стенки патрубка выхода ТН из ПГ |  | м |  | 0.022 |
| 13 | Наружный диаметр патрубка выхода ТН из ПГ |  | м | +2 | 0.405 |
| 14 | Номинальная толщина стенки корпуса ПГ |  | м |  | 0.042 |
| 15 | Наружный диаметр ПГ |  | м | DПГ+2 | 0.764 |
| 16 | Номинальная толщина стенки выпуклого днища ПГ |  | м |  | 0.018 |
| 17 | Коэффициент, зависящий от конструкции днища | К | - | справ. данное, [11] | 0.98 |
| 18 | Коэффициент, зависящий от размера отверстия в крышке | К0 | - | справ. данное, [11] | 1 |
| 19 | Номинальная толщина крышки ПГ |  | м |  | 0.227 |



***Конструктивное оформление парогенератора***

## 

## 3. Тепловой и габаритный расчёт АКТИВНОЙ ЗОНЫ реактора



 = 0.764 м

 = 0.018 м

 = 0.042 м

 = 0.045 м

dвых.ПЕ = 0.07 м

dвх.ПВ = 2.162 м

hдн = 0.37 м

dвх.ТН = 0.269 м

dвых.ТН = 0.405 м

***Рис. 1.6***

hдн







dвх.ПВ

dвх.ТН

## 3.1 Общие положения

## 3.1.1 Конструкция АЗ

Активная зона является основной частью ядерного реактора. В ней расположено ядерное топливо. В нём выделяется тепло, последнее отводится теплоносителю, который циркулирует через АЗ. В современных СЯЭУ наиболее распространены водо-водяные ядерные реакторы с водой под давлением (ВВРД).

АЗ имеет цилиндрическую форму и размещена в так называемой корзине АЗ. Корзина - это цилиндр, торцовые стенки которого представляют собой плиты с отверстиями. ТВС помещаются в эти отверстия корзины.

Основной частью ТВС являются тепловыделяющие элементы (ТВЭЛы). В реакторах типа ВВРД используются стержневые ТВЭЛы. Это цилиндрические топливные стержни, помещённые в герметичные оболочки. Наиболее распространённым топливом ВВРД является керамика UO2, имеющая температуру плавления 2880˚С. Топливный стержень часто собирается из таблеток диаметром dтопл = 6-10мм. между оболочкой и топливными таблетками предусматривается зазор δзаз= 0,05-0,1 мм. Он заполняется гелием, поэтому его называют “гелиевым" зазором. Оболочка ТВЭЛов изготавливается из нержавеющей стали аустенитного класса или циркония и имеет толщину 0,6-0,8 мм. Возможно изготовление топливных стержней из уплотнённого порошка оксидного топлива. В этом случае зазор между оболочкой и топливом отсутствует.

Кроме керамического топлива в реакторах используется дисперсионное топливо. Это топливная композиция, представляющая собой частицы размером 20-500 мкм, равномерно распределённые в металлической матрице из неделящегося материала, например, нержавеющей стали. Такая композиция может быть использована в энергетических реакторах до температур 900˚С. В дисперсионных ТВЭЛах зазор между топливом и оболочкой отсутствует.

Зазоры между соседними стержнями назначают с учётом целого ряда факторов. Если относительный шаг , то такие пучки считаются тесными. Фиксирование ТВЭЛов в решётке производится с помощью дистанцирующих устройств между соседними ТВС всегда предусмотрен зазор до 10-15 мм.

## 2.1.2 Особенности тепловых и температурных полей в АЗ

Важной характеристикой зоны является средняя удельная теплонапряжённость qv. Для ВВРД qv= 70-110 МВт/м3. тепло в зоне выделяется при реакции деления ядер топлива, которая происходит при поглощении ими свободных нейтронов. Эти нейтроны появляются при реакции деления, что делает реакцию самоподдерживающейся (цепной). Понятно, что число актов деления, а следовательно, и тепловая мощность, определяется полностью концентрацией нейтронов в рассматриваемом объёме, т.е. величиной так называемого нейтронного потока Ф.

В свою очередь, величина Ф в любой точке зоны зависит от интенсивности каждого из одновременно действующих трёх факторов:

генерирование нейтронов;

их поглощение;

утечка из рассматриваемого объёма.

Утечка происходит с поверхности зоны, т.е. концентрация нейтронов на её периферии будет меньше, что приведёт к уменьшению интенсивности генерирования и поглощения нейтронов в этих областях. В итоге имеем неравномерное распределение удельного тепловыделения в объёме. Количественно неравномерность можно охарактеризовать радиальным и осевым коэффициентами неравномерности: kr =qmax/q (r) и kz =qmax/q (z).

Наибольшее тепловыделение будет иметь место в точке, наиболее удалённой от внешних границ, т.е. на полувысоте оси цилиндра, наименьшее - на наружных поверхностях. Если окружить зону слоем замедлителя (отражателем), то можно часть нейтронов, покинувших зону, вернуть в неё и благодаря этому уменьшить потребный объём зоны неравномерность в распределении нейтронного и теплового потоков. Модель зоны без отражателя удобна тем, что условия на внешних её границах всегда одинаковы (нейтроны обратно не возвращаются). Благодаря этому распределение нейтронного и теплового потоков в объёме зоны описываются аналитически.

Все активные зоны реальных реакторов имеют отражатель, благодаря чему их размеры меньше, а распределение температур и тепловых потоков становится более сложным.

В приближённых оценках и учебных расчётах используется следующий удобный приём. Рассматривается не зона с отражением, а зона, какой она была бы без отражателя. В этом случае размеры зоны стали бы больше реальных на величину δэф, но характер распределения температур и потоков останется таким же, как в реакторе без отражателя. Именно этот приём используется в данной курсовой работе.

Наиболее напряжённой является центральная ТВС. Если условия в ней приемлемы, то и во всех других - тоже. Поэтому обычно анализируется то, что происходит в осевом канале.

Реактор является подогревателем однофазного жидкого ТН. Но для интенсификации теплообмена внутри зоны в области наибольших удельных тепловых потоков во многих реакторах созданы условия для возникновения поверхностного кипения. Энтальпия ТН вдоль канала только возрастает. Когда она достигает определённой величины iпк, начинается кипение на поверхности ТВЭЛа. Оно продолжается на некоторой части канала пока iпк< iт, и прекращается в точке, за которой энтальпия ТН из-за малых тепловых потоков уже не достигает iпк. Величина iт рассчитывается аналитически.

Для ядерного реактора важным является вопрос о том, насколько максимальная тепловая нагрузка меньше критической, т.е. о запасе по кризису теплообмена. Действительно, в реакторе, как и в электрическом подогревателе, интенсивность тепловыделения не зависит от условий теплоотвода от поверхности ТВЭЛов. При достижении критической тепловой нагрузки, как при наличии, так и в отсутствии кипения, ТВЭЛ покроется паровой плёнкой, теплоотдача от него резко уменьшится. Поскольку тепловыделение продолжается, то температура топлива на сотни градусов возрастёт, произойдёт перегрев и разрушение ТВЭЛа.

Переход к плёночному кипению в отсутствии поверхностного кипения происходит непосредственно от режима течения однофазного ТН. При наличии поверхностного кипения паровая плёнка оттесняет от стенки ТВЭЛа слой кипящего ТН в некипящее ядро потока. Это происходит при другой тепловой нагрузке.

## 2.1.3 Содержание тепловых расчётов

Тепловые расчёты АЗ выполняются как проверка теплотехнической надёжности зоны именно поэтому расчёты заключаются в следующем:

определение максимальной температуры оболочки ТВЭЛов и сравнение её с допустимой;

определение максимальной температуры топлива и сравнение её с допустимой;

определение минимального запаса по критической тепловой нагрузке и сравнение его с допустимым.

## 2.1.4 Расчётная модель

Принимается упрощённая модель со следующими основными характеристиками:

зона имеет отражатель, δэф=60-150 мм (для железоводных отражателей);

распределение удельного теплового потока по высоте зоны косинусоидальное, по радиусу зоны оно описывается функцией Бесселя;

наличие отражателя учитывается величинами kr и kz;

отношение высоты к диаметру равно 1;

решётка ТВЭЛов раздвинутая (не тесная) и взаимное влияние их отсутствует;

при определении максимального удельного тепловыделения учитываются только коэффициенты неравномерности распределения удельного тепловыделения по зоне в целом, т.е. kr и kz;

зазор между топливным стержнем и оболочкой ТВЭЛов отсутствует;

ТВЭЛы образуют абсолютно правильную решётку;

- падение давления по высоте зоны не учитывается.

Dаз

Hаз

Рис.2.1 Основные размеры активной зоны

## 3.2 Проектирование АЗ и ТВС

## 3.2.1 Определение размеров АЗ и ТВС

Таблица 2.2

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| № | Наименование величины | Обозначение | Размерность | Расчётная формула | Числовое значение |
| 1 | Удельная теплонапряжённость АЗ | qv | МВт/м3 | принято, [7] | 100 |
| 2 | Диаметр горючего ТВЭЛа | dгор | м | принято, [7] | 0.009 |
| 3 | Толщина оболочки ТВЭЛа | δоб | м | принято, [7] | 0.0007 |
| 4 | Отношение шага ТВЭЛа к диаметру |  | - | принято, [7] | 1.2 |
| 5 | Ширина межканального зазора | а | м | принято, [7] | 0.012 |
| 6 | Количество ТВЭЛов | nтвэл | - | принято, [7] | 50 |
| 7 | Коэффициент запаса |  | - | принято, [7] | 0.75 |
| 8 | Тепловая мощность реактора | Qр | МВт |  | 89.56 |
| 9 | Объём активной зоны | VАЗ | м3 |  | 0.896 |
| 10 | Диаметр активной зоны | DАЗ | м |  | 1.045 |
| 11 | Высота активной зоны | НАЗ | м | DАЗ | 1.045 |
| 12 | Наружный диаметр ТВЭЛа | dТВЭЛ | м | dгор+2δоб | 0.01 |
| 13 | Расстояние между ТВЭЛами в сборке | t | м |  | 0.012 |
| 14 | Сторона ТВС | S | м |  | 0.09 |
| 15 | Площадь поперечного сечения АЗ | SАЗ | м2 |  | 0.857 |
| 16 | Площадь условной ячейки для квадратного канала |  | м2 |  | 0.01 |
| 17 | Площадь условной ячейки для шестигранного канала |  | м2 | 0,866 (а+S) 2 | ------ |
| 18 | Количество ТВС |  | - |  | 82 |
| 19 | Принятое количество ТВС с учётом их размещения в активной зоне |  | - | См. рис 2.3 | 68 |

Примечание к табл.2.2:

п.14 - на рис. 2.2 приведены примеры размещения ТВЭЛ в ТВС с шестигранной и квадратной формой поперечного сечения.

п.19 -  находится графически.

Размещение ТВЭЛ в канале.

dгор

δкож

δтвэл

dтвэл

t

S

S

a

δкож

t

Рис.2.2

Размещение каналов в активной зоне

S

Dаз

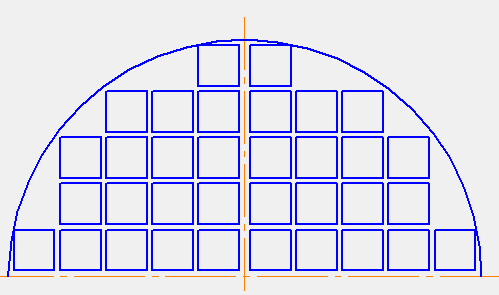
a

Рис.2.3

Dаз = 1.045 м

a = 0.012 м

S = 0.09 м



2.2.2 Выбор параметров теплоносителя

Таблица 2.3

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| № | Наименование величины | Обозначение | Размерность | Расчётная формула | Числовое значение |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 1 | Температура ТН на входе в реактор | Твх | ˚С |  | 262.05 |
| 2 | Температура ТН на выходе из реактора | Твых | ˚С |  | 312.05 |
| 3 | Нагрев ТН в реакторе | ΔТ | ˚С | Твых - Твх | 50 |
| 4 | Температура насыщения ТН | ts | ˚С | f (Рт) - справ. данное, [8] | 332 |
| 5 | Величина недогрева до кипения | Ts | ˚С | ts - Твых | 20 |
| 6 | Коэффициент допустимого увеличения мощности | KN | - | справ. данное | 1.2 |
| 7 | Коэффициент допустимого снижения расхода | KG | - | справ. данное | 0.95 |
| 8 | Предельная температура ТН на выходе из реактора в случае одновременного увеличения мощности и снижения расхода | Tmax | ˚С |  | 330.2 |
| 9 | Энтальпия ТН на выходе из реактора | iвых | кДж/кг |  | 1409 |
| 10 | Энтальпия ТН на входе в реактор | iвх | кДж/кг |  | 1144 |
| 11 | Расход ТН через АЗ | GТН | кг/c |  | 338 |

Примечание к 2.2.2.:

п.8 - условие, исключающее объёмное кипение: Tmax≤ ts

2.2.3 Разработка схемы ТВС

Таблица 2.4

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| № | Наименование величины | Обозначение | Размерность | Расчётная формула | Числ. знач-ие |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 1 | Проходное сечение ТВС |  | м2 |  | 0.0034 |
| 2 | Средняя температура ТН | Тср | ˚С |  | 287.05 |
| 3 | Средний удельный объём ТН | Vср | м3/кг | f (Рт; Тср) | 1.34×10-3 |
| 4 | Средняя скорость теплоносителя | Wср | м/с |  | 1.97 |
| 5 | Площадь поверхности теплообмена для всех ТВЭЛов реактора | Fто | м2 |  | 116.057 |
| 6 | Средний тепловой поток | qср | МВт/м2 |  | 0.6 |

Примечание к 2.2.3:

п.4 - средняя скорость теплоносителя Wср должна быть в интервале (1÷4) м/с.

п.6 - в ВВРД средний тепловой поток не должен превышать (0,4÷0,6) 106 Вт/м2.

2.2.4 Гидравлическое профилирование активной зоны

Таблица 2.5

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| № | Наименование величины | Обозначение | Размерность | Расчётная формула | Числовое  значение |
| 1 | Эффективная добавка | δэф | м | см. п.2.1.4 | 0.09 |
| 2 | Эффективная высота АЗ | Нэф | м | НАЗ+2δэф | 1.225 |
| 3 | Эффективный диаметр АЗ | Dэф | м | Нэф | 1.225 |
| 4 | Коэффициент неравномерности распределения тепловыделения по радиусу АЗ | Kr | - |  | 2.014 |
| 5 | Коэффициент неравномерности распределения тепловыделения по высоте АЗ | Kz | - |  | 1.369 |
| 6 | Объёмный коэффициент неравномерности тепловыделения | Kv | - |  | 2.757 |
| 7 | Максимальный тепловой поток | qmax | МВт/м2 |  | 1.65 |
| 8 | Средняя тепловая мощность ТВС | Qср | МВт |  | 1.32 |
| 9 | Тепловая мощность центральных рабочих каналов | QЦРК | МВт |  | 2.65 |
| 10 | Расход ТН через ЦРК | GЦРК | кг/с |  | 10 |
| 11 | Скорость ТН в ЦРК | WЦРК | м/с |  | 3.97 |

Примечание к 2.2.4. п.11 - Диапазон скоростей ТН в ЦРК составляет (2÷4) м/с.

## 2.3 Проверка теплотехнической надёжности активной зоны

## 2.3.1 Расчёт максимальной температуры оболочки ТВЭЛ

Таблица 2.6

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| № | Наименование величины | Обозначение | Размерность | Расчётная формула | Числовое значение |
| 1 | Энтальпия кипящей воды |  | кДж/кг | f (Pт; ts) - справ. данное, [8] | 2658.1 |
| 2 | Периметр теплообмена ТВЭЛ в сборке и кожуха ТВС | Пт | м |  | 1.995 |
| 3 | Эквивалентный диаметр пучка ТВЭЛ | dэкв | м |  | 0.0068 |
| 4 | Плотность воды при средней температуре ТН |  | кг/м3 |  | 746.269 |
| 5 | Удельный объём кипящей воды |  | м3/кг | f (Pт) - справ. данное, [8] | 1.57×10-3 |
| 6 | Плотность кипящей воды |  | кг/м3 |  | 634.961 |
| 7 | Удельный объём сухого насыщенного пара |  | м3/кг | f (Рт) - справ. данное, [8] | 1.25×10-2 |
| 8 | Плотность сухого насыщенного пара |  | кг/м3 |  | 80 |
| 9 | Распределение теплового потока по высоте ТВЭЛ | q (Zi) | Вт/м2 |  | ---- |
|  | число участков разбиения ТВЭЛ по высоте | i | - | принято (например 20) | 19 |
|  | Высота соответствующего участка | Zi | м |  | ----- |
| 10 | Энтальпия ТН, при которой температура оболочки постоянна |  | кДж/кг |  |  |
| 11 | Периметр теплообмена ТВС |  | м |  | 1.634 |
| 12 | Энтальпия ТН по длине ТВС | iт (Zi) | Дж/кг | См. примечание к табл.2.6 |  |
| 13 | Полное поперечное сечение ТВЭЛ в пучке | SТВ | м2 |  | 4.25×10-3 |
| 14 | Плотность решётки стержней |  | - |  | 1.256 |
| 15 | Коэффициент заполнения пучка ТВЭЛ |  | - |  | 0.704 |
| 16 | Эффективный диаметр | d | м |  | 4.771×10-3 |
| 17 | Кинематическая вязкость |  | м2/с | f (Tср; Pт) - справ. данное, [8] | 1.24×10-7 |
| 18 | Критерий Re | Re | - |  | 152600 |
| 19 | Критерий Pr | Pr | - | f (Tср; Pт) - справ. данное, [8] | 0.843 |
| 20 | Теплопроводность ТН |  |  | f (Tср; Pт) - справ. данное, [8] | 0.578 |
| 21 | Коэффициент теплоотдачи |  |  |  | 36510 |
| 22 | Термическое сопротивление теплоотдачи |  |  |  | 2.74×10-5 |
| 23 | Удельная теплоёмкость ТН | Ср |  |  | 5.3 |
| 24 | Координата точки по длине ТВЭЛ, в которой достигается max температура оболочки | ZОБ | м |  | 0.611 |
| 25 | Максимальная температура оболочки ТВЭЛ |  | ˚С | См. примечание к табл.2.6 | 330.851 |
| 26 | Допускаемая температура оболочки ТВЭЛ |  | ˚С | См. примечание к п.2.3.1 | 370 |
| 27 | Условие теплотехнической надёжности |  |  | ≤ | есть |

Примечание к п.2.3.1

iт (Zi) = 

2.  = 

3. Значения коэффициента теплопроводности материалов

Таблица 2.7

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Материал оболочки | Температура,˚С | | | |
| 200 | 300 | 400 | 500 |
| Цирконий | 19,3 | 20,1 | 20,5 | 20,9 |
| Нержавеющая сталь | 17,6 | 18,8 | 21,4 | 23,0 |

Значения коэффициента теплопроводности ядерного топлива

UO2 (λтопл), вт/м·град

Таблица 2.8

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | Температура,˚С | | | | | |
| 500 | 1000 | 1500 | 2000 | 2500 | 2800 |
| UO2 | 4,4 | 3,0 | 2,3 | 2,4 | 3,2 | 3,7 |

5. Предельно допустимые значения температур оболочек, изготовленных из нержавеющей стали= (360÷380) ˚С.

6. Зона по высоте делится на некоторое число участков и для каждой из промежуточных точек определяется q (Zi), , iт (Zi).

7. Все значения, полученные в ходе расчёта максимальной температуры оболочки ТВЭЛ (п. п.9, 10 и 12), для удобства дальнейшего пользования необходимо свести в единую таблицу

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| №участка i | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Z, м | -0.523 | -0.464 | -0.406 | -0.348 | -0.290 | -0.232 |
| q (Z), Вт/м2 | 375900 | 614400 | 835300 | 1038000 | 1217000 | 1370000 |
| iпк (Z), Дж/кг | 2.6×106 | 2.55×106 | 2.51×106 | 2.47×106 | 2.44×106 | 2.41×106 |
| iт (Z), МДж/кг | 1.144 | 1.149 | 1.156 | 1.164 | 1.175 | 1.187 |

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| №участка i | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| Z, м | -0.174 | -0.116 | -0.058 | 0 | 0.058 | 0.116 |
| q (Z), Вт/м2 | 1492000 | 1581000 | 1636000 | 1654000 | 1636000 | 1581000 |
| iпк (Z), Дж/кг | 2.38×106 | 2.36×106 | 2.352×106 | 2.347×106 | 2.351×106 | 2.36×106 |
| iт (Z), МДж/кг | 1.201 | 1.216 | 1.231 | 1.246 | 1.262 | 1.277 |

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| № участка i | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 |
| Z, м | 0.174 | 0.232 | 0.290 | 0.348 | 0.406 | 0.464 | 0.523 |
| q (Z), Вт/м2 | 1492000 | 1370000 | 1217000 | 1038000 | 835300 | 614400 | 375900 |
| iпк (Z), Дж/кг | 2.38×106 | 2.41×106 | 2.44×106 | 2.47×106 | 2.51×106 | 2.55×106 | 2.6×106 |
| iт (Z), МДж/кг | 1.292 | 1.305 | 1.318 | 1.328 | 1.337 | 1.344 | 1.349 |

По полученным результатам в координатах i-Z строим графики зависимостей iпк (Z) и iт (Z), по которым определяем, происходит ли теплообмен между ТН и ТВЭЛ без поверхностного кипения. (рис.2.5)

8. Если поверхностное кипение имеет место, то рассчитывается коэффициент теплоотдачи в области поверхностного кипения и температура оболочки .

Рис 2.3 Распределение температур в ТВЭЛ

dтвэл

δоб

tгор

tт

tоб

δзаз

Нпг

ПК

0

-Hаз/2

Δtоб,жпк

t,°C

100

200

300

0

tобmax

Δtоб,ж

tоб

tт

Hаз/2

Рис 2.4 Качественный график распределения температур по высоте зоны

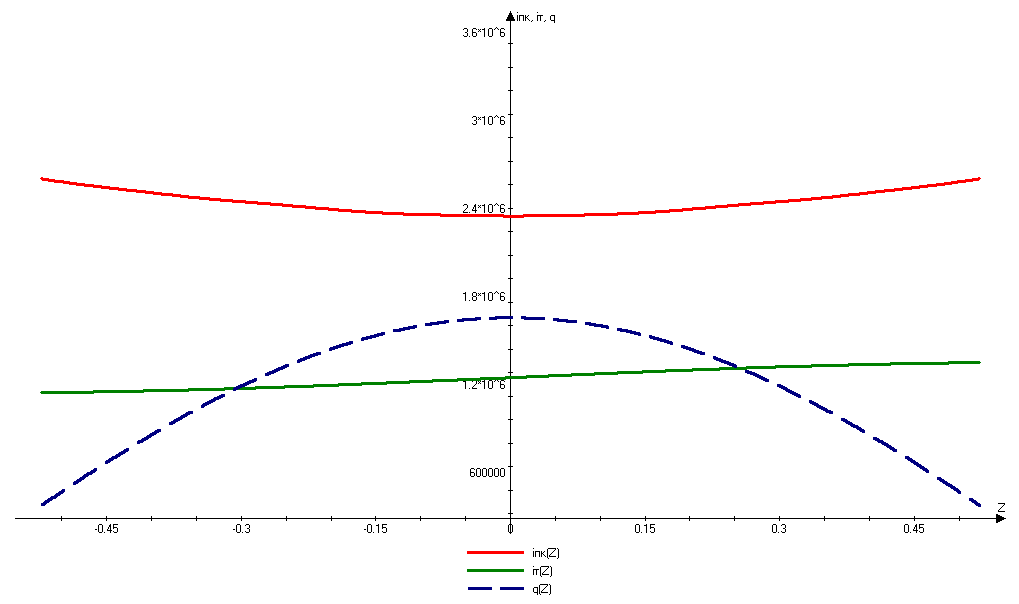


Рис.2.5 Определение границ участка поверхностного кипения

## 2.3.2 Расчёт максимальной температуры ядерного горючего

Таблица 2.7

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| № | Наименование величины | Обозначение | Размерность | Расчётная формула | Численное  значение |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 1 | Коэффициент теплопроводности оболочки |  |  | справ. данное | 19.54 |
| 2 | Коэффициент теплопроводности горючего |  |  | справ. данное | 3.6 |
| 3 | Термическое сопротивление оболочки |  |  |  | 3.58×10-5 |
| 4 | Термическое сопротивление горючего ТВЭЛ |  |  |  | 7.3×10-4 |
| 5 | Координата точки по длине ТВЭЛ, в которой достигается max температура горючего ТВЭЛ |  | м |  | 5.93×10-3 |
| 6 | Максимальная температура горючего ТВЭЛ |  | ˚С | См. приложение к таблице 2.7 | 1000 |
| 7 | Допускаемая температура горючего ТВЭЛ |  | ˚С | См. приложение к таблице 2.7 | 1587 |
| 8 | Условие теплотехнической надёжности |  |  | ≤ | есть |

Примечание к 2.3.2

1. Предельно допустимое значение температуры для UO2

=2800˚С

2.

=

Качественный график распределения температуры горючего

Hаз/2

-Hаз/2

500

1000

2000

tгор,°C

0

tгорmax

Рис.2.6

## 2.3.3 Расчёт запаса по кризису теплообмена

Таблица 2.8

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| № | Наименование величины | Обозна чение | Размер ность | Расчётная формула | Числ. знач. |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 1 | Теплота парообразования | r | кДж/кг | f (Pт) - справ. данное | 1118.7 |
| 2 | Относительная энтальпия потока в сечении Z | X (Zi) | - |  |  |
| 3 | Критический тепловой поток | qкр (Zi) | МВт/м2 |  |  |
| 4 | Коэффициент запаса по кризису теплообмена | Ккр (Zi) | - |  |  |

Примечание к п.2.3.3.:

1) Коэффициент запаса по кризису теплообмена должен быть 

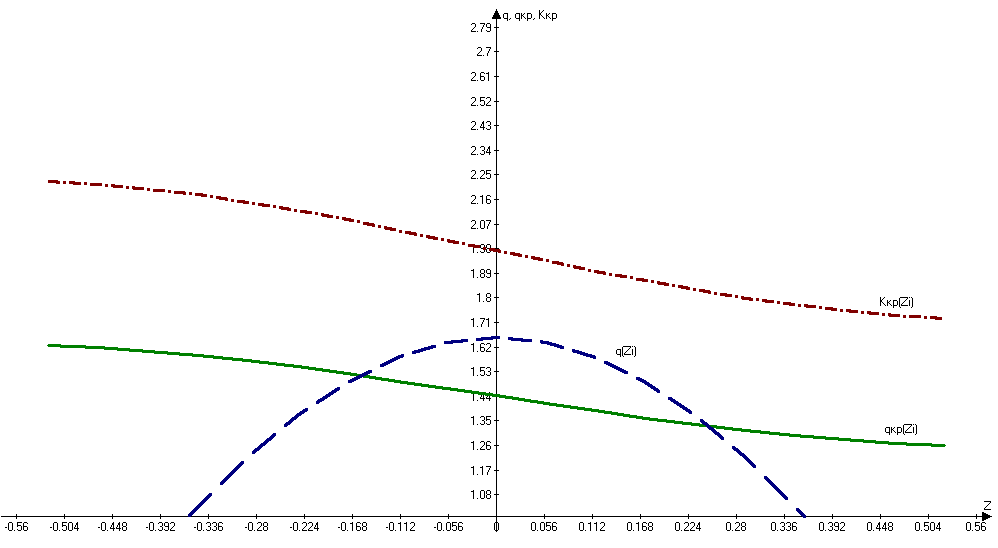
2) Все значения, полученные в ходе расчёта запаса по кризису теплообмена (п. п.2, 3 и 4), свести в единую таблицу.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| № участка i | qкр (Z), МВт/м2 | Ккр (Z) | X (Z) |
| 1 | 1.626 | 2.227 | 0.091 |
| 2 | 1.617 | 2.214 | 0.095 |
| 3 | 1.604 | 2.197 | 0.101 |
| 4 | 1.589 | 2.177 | 0.108 |
| 5 | 1.569 | 2.149 | 0.118 |
| 6 | 1.547 | 2.120 | 0.129 |
| 7 | 1.522 | 2.085 | 0.142 |
| 8 | 1.495 | 2.048 | 0.155 |
| 9 | 1.468 | 2.011 | 0.168 |
| 10 | 1.441 | 1.974 | 0.182 |

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| № участка i | qкр (Z), МВт/м2 | Ккр (Z) | X (Z) |
| 11 | 1.413 | 1.935 | 0.196 |
| 12 | 1.386 | 1.898 | 0.209 |
| 13 | 1.359 | 1.862 | 0.223 |
| 14 | 1.336 | 1.830 | 0.234 |
| 15 | 1.313 | 1.799 | 0.246 |
| 16 | 1.296 | 1.775 | 0.255 |
| 17 | 1.280 | 1.753 | 0.263 |
| 18 | 1.268 | 1.736 | 0.269 |
| 19 | 1.259 | 1.724 | 0.274 |

По полученным результатам в координатах q-Z и K-Z строим графики зависимостей qкр (Z), Ккр (Z) и q (Z) - данные из предыдущей таблицы. Все построения произвести в одной координатной плоскости.

Для обеспечения теплотехнической надежности необходимо, чтобы минимальное значение запаса по кризису было не меньше 2-2,2.



Определение запаса по кризису теплообмена

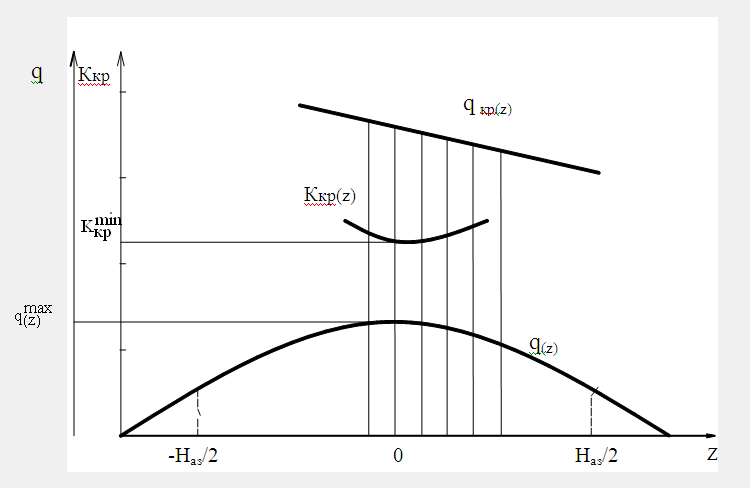


Рис.2.7

Если полученный запас недостаточен, то необходимо изменить конструкцию активной зоны. Увеличить Ккр можно путем уменьшения q (z), если увеличить поверхность нагрева или повысить q кр, если изменить скорость теплоносителя или его параметры в соответствии с формулой 3 из табл.2.8

## Список литературы

1. Аин Е.М. Методические указания к курсовому проектированию по дисциплинам “Теоретические основы судовой энергетики” и “Гидрогазодинамика и теплообмен”. Северодвинск: Севмашвтуз, 1998 г.
2. Андреев П.А. и др., Теплообменные аппараты ядерных энергетических установок. Л.: Судостроение, 1965г.
3. Ермилов В.Г. Теплообменные аппараты и конденсационные установки. М.: Транспорт, 1964г.
4. Кириллин и др. Техническая термодинамика. М.: Энергоатомиздат, 1983г.
5. Кириллов П.Л. и др. Справочник по теплогидравлическим расчётам (ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы). М.: Энергоатомиздат, 1984г.
6. Кузнецов В.А. Судовые ядерные энергетические установки (конструкции и особенности эксплуатации). Л.: Судостроение, 1989г.
7. Пейч Н.Н. Тепловой расчёт активной зоны водо-водяного реактора. Л.: ЛКИ, 1981г.
8. Ривкин С.Л., Александров А.А. Теплофизические свойства воды и водяного пара. М.: Энергия, 1980г.
9. Терентьев В.Д. Основы тепловых и гидравлических расчётов ядерных реакторов и парогенераторов. Л.: Судостроение, 1967 г.
10. Турлаков А.С., Кожемякин В.В. Проектирование парогенераторов судовых ЯЭУ. Л.: ЛКИ, 1982г.
11. Шаманов Н.П. и др. Судовые ядерные паропроизводящие установки. Л.: Судостроение, 1990 г.