**Глава 2**

**Теплогидравлический расчет**

**2.1 Исходные данные.**

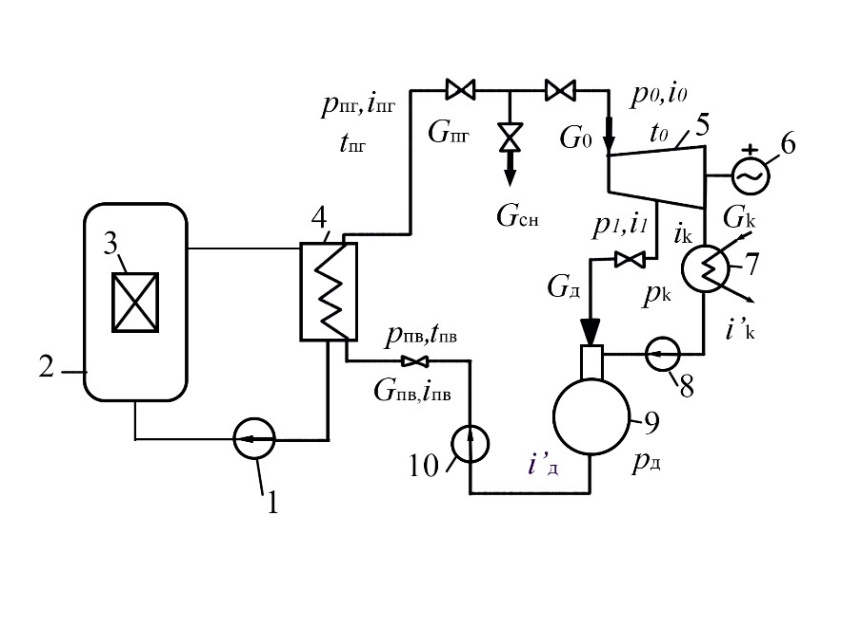
Приведем исходные данные, заданные на начальной стадии проекта.

1. Компоновка АППУ:

­­

**Рисунок 2.1** Блочная реакторная установка КЛТ-40С: 1 – защитная оболочка; 2 – бак железоводной защиты; 3 – стальная периферийная биологическая защита; 4 – трубопроводы; 5 – бетонная периферийная биологическая защита; 6 – арматура; 7 – полносъемная стальная выгородка; 8 – парогенератор; 9 – съемная биологическая защита парогенераторов; 10 – стационарная биологическая защита парогенераторов; 11 – реактор; 12 – насосы первого контура; 13 – съемная биологическая защита парогенераторов

1. Структурная тепловая схема РУ КЛТ-40С:



**Рисунок. 2.2** Принципиальная тепловая схема РУ КЛТ-40С для ПЭБ: 1-ЦНПК; 2 - ПГБ; 3 – активная зона реактора; 4 – ПГ; 5 – паровая турбина; 6 – электрогенератор; 7 – конденсатор; 8 – конденсатный насос; 9 – деаэратор; 10 - питательный насос

1. Конструкция основной ТВС реактора:



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

1. Принципиальная конструктивная схема реактора:

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

1. Конструкция ТВС реактора:



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

1. Общие технические характеристики ПАТЭС:

Таблица 2.1 - Общие технические характеристики проектируемой ПАТЭС

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

1. Основные технические характеристики ТВС активной зоны:

Таблица 2.2 – Основные технические характеристики ТВС активной зоны

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

**2.2 Расчет КПД АППУ и тепловой мощности реактора.**

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

Таблица 2.3 – Дополнительные характеристики для расчета КПД АППУ

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

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



**Рисунок 2.6** Цикл Ренкина

Рассмотрим процессы, изображенные на рисунке 2.6:

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

Термический КПД цикла Ренкина без регенерации:

Термический КПД цикла Ренкина при идеальной регенерации:

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

КПД брутто для всех типов установок:

Тепловая мощность реактора:

Результаты расчета представлены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Результаты расчета КПД АППУ и тепловой мощности реактора

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

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

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

Относительный шаг:

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



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

Определим эквивалентный диаметр активной зоны:

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

Таблица 2.5 – Дополнительные геометрические характеристики ТВС

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

Таблица 2.5 – Дополнительные геометрические характеристики активной зоны

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Результаты расчета представлены в таблице 2.7.

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

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

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

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

**2.5 Расчет средних тепловых характеристик активной зоны РУ.**

Рассчитаем средние тепловые характеристики на основе полученных выше данных.

Удельная энергонапряженность активной зоны:

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

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

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

Средняя плотность теплового потока на поверхности твэлов:

Полученные значения представлены в таблице 2.8.

Таблица 2.8 – Результаты расчета тепловых характеристик активной зоны РУ

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

Расчеты проведены при .

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

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

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

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

где . Результаты отражены на рисунке 2.8.



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

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



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



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



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



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

**

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

Таблица 2.9 - Основные теплогидравлические характеристики ТВСМ

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

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

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

**2.7 Оценка коэффициента запаса до кризиса теплообмена.**

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

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

– учитывает относительный шаг расположения стержней;

– учитывает влияние на КТП входных условий сборки;

– учитывает турбулизирующее взаимодействие на кризис кипения решеток.

Результаты расчета приведены в таблице 2.10.

Таблица 2.10 – Поправочные коэффициенты к табличным данным КТП

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

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

Таблица 2.11 - Табличные значения КТП

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

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

где

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

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

**

**Рисунок 2.13** Определение запаса до кризиса теплообмена

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

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

*,*

а коэффициент запаса до кризиса теплообмена:

**2.8 Расчет гидравлических сопротивлений ТВС.**

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

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

*,*

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

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

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

Расcчитаем сопротивление трения в пучке твэлов и СВП ТВСМ:

,

где – коэффициент сопротивления трения.

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

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

Рассчитаем местные сопротивления. При расчете необходимо учесть:

– сопротивление входных участков сборки;

– сопротивление выходных участков сборки;

– сопротивление нижней опорной решетки стержней;

– сопротивление верхней опорной решетки стержней;

– сопротивление дистанционирующих решеток;

– сопротивление дроссельной заслонки;

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

Таблица 2.14 - Местные сопротивления в ТВСМ

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

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

Затраты мощности на прокачку теплоносителя:

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