

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
 ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Инженерная школа энергетики

Специальность: **14.05.02 Атомные станции: проектирование, эксплуатация и инжиниринг**
 НОЦ И.Н. Бутакова

ДИПЛОМНЫЙ ПРОЕКТ

Тема работы
ПРОЕКТ ТЕПЛОФИКАЦИОННОГО ЭНЕРГОБЛОКА АЭС С РЕАКТОРОМ ТИПА ВВЭР-600

УДК 621.311.25:621.039.577

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5051	Канищев Александр Валерьевич		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ	Д.В. Гвоздяков	к.т.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	В.В. Гузырь	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ООД ШБИП	И.Л. Мезенцева	к.т.н.		

По разделу «Автоматизация технологических процессов»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ	Ю.К. Атрошенко	к.ф.-м.н.		

Нормоконтроль

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ст. преподаватель НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ	М.А. Вагнер	—		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
14.05.02 Атомные станции: проектирование, эксплуатация и инжиниринг	А.В. Воробьев	к.т.н., доцент		

Томск – 2021 г.

Реферат

Выпускная квалификационная работа: 115 страниц, 26 рисунков, 19 таблиц, 3 приложения, 4 раздела, 35 использованных источников, 5 листов графического материала.

Ключевые слова: реактор, парогенератор, турбина, электростанция, энергия, пар, уран, деаэрактор, энтальпия, расход, цилиндр, преобразование, процесс, влажность, сепаратор.

Объектом разработки и проектирования является энергоблок атомной электростанции с водо-водяным энергетическим реактором, имеющий электрическую мощность 600 МВт.

Целью данной работы является разработка и проектирование энергоблока АЭС на заданные параметры.

Полученные результаты говорят о том, что энергоблок удовлетворяет требуемым параметрам безопасности, надежности и экономической эффективности.

Получены основные технические характеристики: расход пара на турбину – 1199 кг/с; коэффициент полезного действия (нетто) – 35,2%; тепловая мощность парогенератора (единичная) – 467615 кВт.

Рекомендуется уточнить расчеты. Следует учесть гидравлические потери в реакторе, в парогенераторе. Потери температуры по пути от реактора до парогенератора.

Степень внедрения: расчет может применяться при проектировании АЭС в городе Норильск.

Область применения: топливно-энергетический комплекс, электроэнергетика, атомная энергетика, проектирование атомных электростанций.

					<i>ФЮРА.XXXXXXX.001 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		2

Список принятых обозначений и сокращений

- АЭС – атомная электростанция;
ВВЭР – водо-водяной энергетический реактор;
АКиР – автоматизированный контроль и регулирование;
ПНД – подогреватель низкого давления;
ПВД – подогреватель высокого давления;
ПГ – парогенератор;
РППВ – регенеративный подогрев питательной воды;
ПТУ – паротурбинная установка;
ЦНД – цилиндр низкого давления;
ЦСД – цилиндр среднего давления;
ЦВД – цилиндр высокого давления;
ПСВ – подогреватель сетевой воды;
ОЭ – охладитель эжекторов;
ОУ – охладитель уплотнений;
БОУ – блочная обессоливающая установка;
ОД – охладитель дренажа;
СК – стопорный клапан;
ОК – отсечной клапан;
СРК – стопорно-регулирующий клапан;
ИОФ – ионно-обменный фильтр;
КПД – коэффициент полезного действия;
ЭБ – энергоблок;
ТП – тепловой потребитель;
ЭГ – электрогенератор;
ОС – обратная сеть;
ПС – прямая сеть.

					ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		3

Оглавление

Введение	6
1 Проект энергоблока.....	7
1.1 Расчет теплофикационного режима схемы	7
1.1.1 Анализ принципиальной тепловой схемы прототипа	7
1.1.2 Разбиение РППВ по ступеням	8
1.1.3 Построение процесса расширения в hs-диаграмме.....	11
1.1.4 Определение числа потоков.....	17
1.1.5 Расчет сетевой установки.....	18
1.1.6 Температурный график теплосети.....	21
1.1.7 Уравнения материальных и тепловых балансов	22
1.1.8 Расчет показателей тепловой экономичности.....	30
1.2 Выбор тепломеханического оборудования	33
1.2.1 Выбор теплообменников	33
1.2.2 Выбор насосов	38
1.2.3 Выбор конденсаторов.....	42
1.3 Расчет парогенератора.....	43
1.3.1 Выбор конструктивной и теплотехнической схемы.....	44
1.3.2 Расчет и построение тепловой диаграммы.....	45
1.3.3 Тепловой расчет поверхности нагрева	48
1.3.3.1 Определение количества трубок.....	48
1.3.3.2 Экономайзерный участок	48
1.3.3.3 Испарительный участок	51
1.3.3.3 Пароперегревательный участок	55
1.4 Расчет ядерного реактора	56
1.4.1 Обоснование конструкции реакторной установки	56
1.4.2 Определение основных геометрических характеристик	57
1.4.3 Определение параметров теплоносителя	60
1.4.4 Теплотехнический расчет.....	61
1.4.5 Расчет параметров по высоте активной зоны	68

					<i>ФЮРА.XXXXXX.001 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		4

1.4.6 Построение графиков и анализ результатов	71
2 Автоматический контроль и регулирование деаэратаора.....	75
2.1 Краткое описание технологического оборудования	75
2.2 Постановка задачи АКиР	78
2.3 Выбор оптимальной схемы АКиР	78
2.4 Разработка функциональной схемы	80
2.5 Обзор выпускаемых средств измерения и регулирования.....	80
2.6 Составление заказной спецификации.....	81
Заключение	82
Приложение А	83
Приложение Б.....	84
Приложение В.....	85
Графический материал: на отдельных листах	
ФЮРА.ХХХХХХ.002 ТЗ. Развернутая тепловая схема энергоблока	
ФЮРА.693410.003 ВО. Чертеж общего вида парогенератора	
ФЮРА.693100.004 ВО. Чертеж общего вида реактора	
ФЮРА.421000.005 С2. Деаэратор продувочной воды. Система продувки-подпитки первого контура. Схема функциональная	
Демонстрационный лист. Распределение параметров теплоносителя по высоте активной зоны.	

Введение

Известно, что в городе Норильск достаточно сложная ситуация с чистотой городского воздуха. Ответственность за превышение предельно допустимых концентраций лежит на предприятиях, приносящих городу прибыль и тепло. В перспективе можно рассмотреть замену мощностей норильских теплоэлектростанций и котельной энергоблоком АЭС с теплофикацией.

На сегодняшний день в России 37 действующих энергоблоков АЭС. Проектируемый блок может расширить этот список, пополнив ряды станций с водо-водяным энергетическим реактором.

Данный проект выполнен не без помощи электронно-вычислительной машины, а также полезных прикладных программ: Microsoft Office Excel, Wolfram Mathematica и Mathcad. Чертежи выполнены в КОМПАС 3D. Расчет схемы выполнен с помощью метода относительных расходов. Некоторые расчеты активной зоны реактора и тепловой расчет парогенератора выполнены методом итераций.

					<i>ФЮРА.XXXXXXX.001 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		6

1 Проект энергоблока

Три основные задачи, которые следует решить в этом разделе, это расчет схемы, расчет парогенератора, расчет реактора. Исходными данными служит электрическая мощность блока, начальные параметры пара (говорящие о том, что цикл на слабо перегретом паре), конечное значение давления и другие характеристики. Рассчитав схему, будет найден расход пара на турбину, который обеспечит необходимую электрическую мощность. Найденный расход послужит одним из параметров исходных данных для проекта парогенератора. Расчет температуры питательной воды тоже необходим для расчета следующего подраздела (проект парогенератора).

1.1 Расчет теплофикационного режима схемы

Известно, что энергоблок может работать как в конденсационном режиме, так и в теплофикационном. Последний подразумевает под собой совместную выработку электрической и тепловой энергии, первый – только электрическую энергию. Для расчета есть необходимые данные, а именно: мощность теплофикационной установки и её состав; температура прямой и обратной сети.

1.1.1 Анализ принципиальной тепловой схемы прототипа

Обратившись к источнику [7], находим интересующую нас схему. Схема прототипа продемонстрирована на рисунке 1.1.1. Из рисунка видим, что система осушки пара представляет собой сепарацию и последующий двукратный перегрев пара. В проектном блоке подлежит расчету система осушки с двукратной сепарацией, до и после цилиндра среднего давления, в соответствии с техническим заданием. Число цилиндров низкого давления предстоит определить.

					<i>ФЮРА.XXXXXX.001 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		7

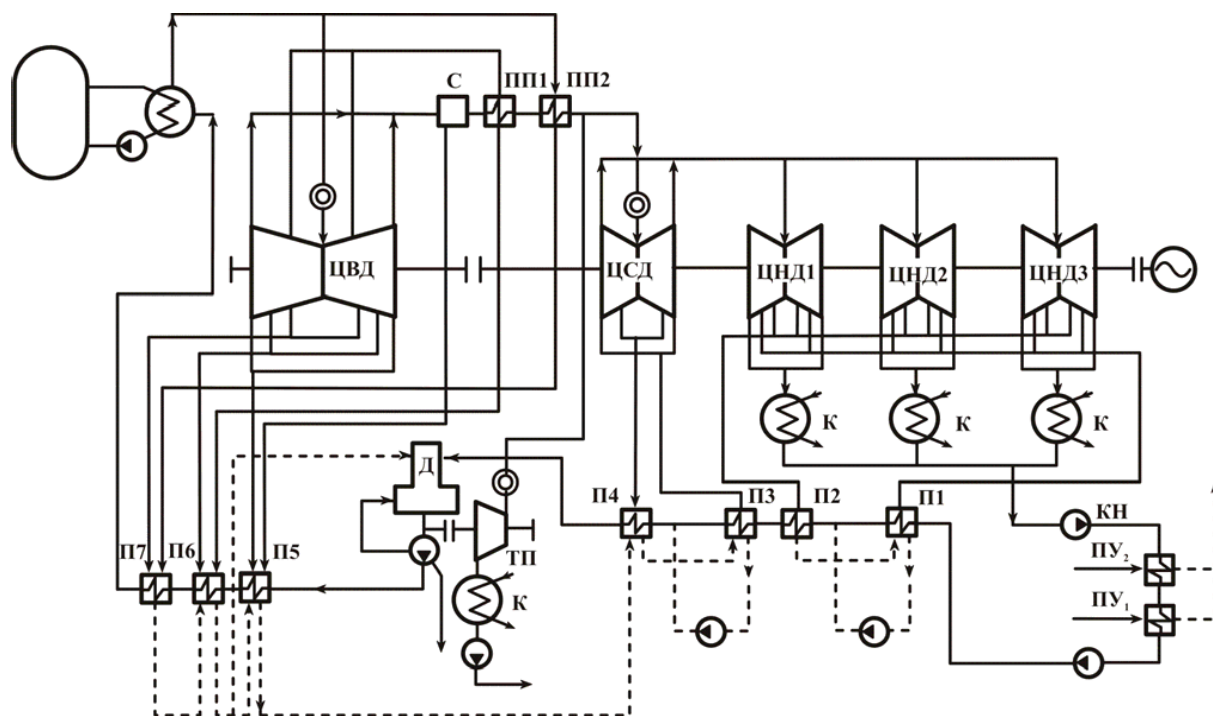


Рисунок 1.1.1 – Принципиальная схема АЭС с ТУ К-1000-60/1500-1[7]

Произведем замену турбопитательного насоса на питательный насос, работающий от электричества, такое решение сократит капитальные затраты, сократит расчёты, но увеличит расходы на собственные нужды энергоблока.

1.1.2 Разбиение РППВ по ступеням

Давление в отборах и число РППВ определяются путем оптимального распределения подогрева воды по ступеням. Все РППВ – поверхностные. Деаэратор включен по самостоятельной схеме, которая подразумевает постоянное давление в деаэраторе (греется от отдельного отбора турбины). Конденсат турбины пропускается через БОУ, поэтому в тракт включены конденсатные насосы первого и второго подъемов.

Зная давление в деаэраторе, определим температуру воды на выходе из деаэратора:

$$t_{д}^{в\text{ых}} = f(p_{д} = 0,76 \text{ МПа}) = 168,3^{\circ}\text{C}.$$

Зададим подогрев воды в деаэраторе (12 – 15°C, [7, с. 187]):

$$\Delta t_d = 13,3^\circ\text{C}.$$

Температура основного конденсата на входе в деаэратор:

$$t_d^{\text{BX}} = t_d^{\text{ВЫХ}} - \Delta t_d = 168,3 - 13,3 = 155^\circ\text{C}.$$

Найдем температуру после питательного насоса.

$$\Delta h_{\text{ПН}} = \frac{v' \cdot (p_{\text{ПН}} - p_d)}{\eta_{\text{ПН}}};$$

$$v' = f(p_d) = 1,11 \frac{\text{М}^3}{\text{КГ}};$$

$\eta_{\text{ПН}}$ – КПД насоса, примем 0,8 (0,75 ÷ 0,83) [7, с.187].

$$p_{\text{ПН}} = (1,3 \div 1,5) \cdot p_0 = 1,4 \cdot p_0 = 1,4 \cdot 7 = 9,8 \text{ МПа};$$

$$\Delta h_{\text{ПН}} = \frac{1,11 \cdot 10^{-3} \cdot (9,8 - 0,76) \cdot 10^3}{0,8} = 12,5 \frac{\text{кДж}}{\text{КГ}};$$

$$h_{\text{ПН}} = h'_d + \Delta h_{\text{ПН}} = 711,7 + 12,5 = 724,2 \frac{\text{кДж}}{\text{КГ}}.$$

По энтальпии и давлению питательного насоса, определяем температуру за питательным насосом:

$$t_{\text{ПН}} = f(p_{\text{ПН}}; h_{\text{ПН}}) = 170^\circ\text{C}.$$

Температура основного конденсата на выходе из конденсатора:

$$t'_k = f(p_k = 35 \text{ кПа}) = 26,7^\circ\text{C}.$$

Принимаем нагрев основного конденсата в охладителе уплотнений и охладителе эжекторов 3,3°C и 3°C, тогда температура основного конденсата перед трактом низкого давления:

$$t_{\text{ОКк}} = t'_k + \Delta t_{\text{Оэ}} + \Delta t_{\text{Оу}} = 26,7 + 3 + 3,3 = 33^\circ\text{C}.$$

Значение оптимального подогрева составляет $\Delta t_{\text{ПНД}}^{\text{ОПТ}} = 25 \div 35^\circ\text{C}$ [7, с.186], нагрев в тракте:

$$\Delta t_{\text{ОК}}^{\text{ПНД}} = t_d^{\text{BX}} - t_{\text{ОКк}} = 155 - 33 = 122^\circ\text{C}.$$

Принимаем количество ПНД $z_{\text{ПНД}} = 4$, тогда:

$$\Delta t_{\text{ПНД}} = \frac{\Delta t_{\text{ОК}}^{\text{ПНД}}}{z_{\text{ПНД}}} = \frac{122}{4} = 30,5^\circ\text{C}.$$

					ФЮРА.XXXXXX.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		9

Определяем температуры основного конденсата в тракте низкого давления:

$$t_{\text{OK}}^8 = t_{\text{OKK}} + \Delta t_{\text{ПНД}} = 33 + 30,5 = 63,5^\circ\text{C};$$

$$t_{\text{OK}}^7 = t_{\text{OK}}^8 + \Delta t_{\text{ПНД}} = 63,5 + 30,5 = 94^\circ\text{C};$$

$$t_{\text{OK}}^6 = t_{\text{OK}}^7 + \Delta t_{\text{ПНД}} = 94 + 30,5 = 124,5^\circ\text{C};$$

$$t_{\text{OK}}^5 = t_{\text{OK}}^6 + \Delta t_{\text{ПНД}} = 124,5 + 30,5 = 155^\circ\text{C}.$$

Температура насыщения в каждом ПНД определяется с учетом недогрева воды. Для ПНД недогрев принимается 1 – 3 градуса. Зададимся:

$$\theta_{\text{ПНД}} = 2^\circ\text{C}, \text{ тогда:}$$

$$t_{s8} = t_{\text{OK}}^8 + \theta_{\text{ПНД}} = 63,5 + 2 = 65,5^\circ\text{C}; \quad p_{\text{п8}} = f(t_{s8}) = 0,0256 \text{ МПа};$$

$$t_{s7} = t_{\text{OK}}^7 + \theta_{\text{ПНД}} = 94 + 2 = 96^\circ\text{C}; \quad p_{\text{п7}} = f(t_{s7}) = 0,0878 \text{ МПа};$$

$$t_{s6} = t_{\text{OK}}^6 + \theta_{\text{ПНД}} = 124,5 + 2 = 126,5^\circ\text{C}; \quad p_{\text{п6}} = f(t_{s6}) = 0,243 \text{ МПа};$$

$$t_{s5} = t_{\text{OK}}^5 + \theta_{\text{ПНД}} = 155 + 2 = 157^\circ\text{C}; \quad p_{\text{п5}} = f(t_{s5}) = 0,572 \text{ МПа}.$$

Определяем температуры основного конденсата в тракте высокого давления. Принимаем $\Delta t_{\text{ПВД}} = 25^\circ\text{C}$, $\theta_{\text{ПВД}} = 2^\circ\text{C}$;

$$t_{\text{ПВ3}} = t_{\text{ПН}} + \Delta t_{\text{ПВД}} = 170 + 25 = 195 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$t_{s3} = t_{\text{ПВ3}} + \theta_{\text{ПВД}} = 195 + 2 = 197 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$t_{\text{ПВ2}} = t_{\text{ПВ3}} + \Delta t_{\text{ПВД}} = 195 + 25 = 220 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$t_{s2} = t_{\text{ПВ2}} + \theta_{\text{ПВД}} = 220 + 2 = 222 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$t_{\text{ПВ1}} = t_{\text{ПВ2}} + \Delta t_{\text{ПВД}} = 220 + 25 = 245 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$t_{s1} = t_{\text{ПВ1}} + \theta_{\text{ПВД}} = 245 + 2 = 247 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Определим давления греющих потоков:

$$p_{\text{п4}} = f(t_{s4}) = 0,76 \text{ МПа};$$

$$p_{\text{п3}} = f(t_{s3}) = 1,46 \text{ МПа};$$

$$p_{\text{п2}} = f(t_{s2}) = 2,41 \text{ МПа};$$

$$p_{\text{п1}} = f(t_{s1}) = 3,78 \text{ МПа}.$$

					ФЮРА.XXXXXX.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		10

Деаэратор – это элемент в схеме, разделяющий тракты низкого и высокого давления (тракты основного конденсата и питательной воды). Условно его будем считать для упрощения нумерации подогревателем смешивающего типа, имеющим порядковый номер 4.

Определяем давления отбираемого пара на каждую ступень регенеративного подогрева, которые с учетом 3% [7] потерь давления в паропроводах, равны:

$$p_1 = 1,03 \cdot p_{п1} = 1,03 \cdot 3,78 = 3,89 \text{ МПа};$$

$$p_2 = 1,03 \cdot p_{п2} = 1,03 \cdot 2,41 = 2,48 \text{ МПа};$$

$$p_3 = 1,03 \cdot p_{п3} = 1,03 \cdot 1,46 = 1,504 \text{ МПа};$$

$$p_4 = 1,03 \cdot p_{п4} = 1,03 \cdot 0,76 = 0,78 \text{ МПа};$$

$$p_5 = 1,03 \cdot p_{п5} = 1,03 \cdot 0,572 = 0,59 \text{ МПа};$$

$$p_6 = 1,03 \cdot p_{п6} = 1,03 \cdot 0,243 = 0,25 \text{ МПа};$$

$$p_7 = 1,03 \cdot p_{п7} = 1,03 \cdot 0,0878 = 0,0904 \text{ МПа};$$

$$p_8 = 1,03 \cdot p_{п8} = 1,03 \cdot 0,0256 = 0,0264 \text{ МПа}.$$

Определим разделительное давление. Принимаем, что отбор в деаэратор идет из выхлопного патрубка ЦВД, тогда $p_{\text{разд1}} = p_4 = 0,78 \text{ МПа}$, 7-ой отбор идет из выхлопа ЦСД, тогда $p_{\text{разд2}} = p_7 = 0,0904 \text{ МПа}$.

1.1.3 Построение процесса расширения в *hs*-диаграмме

Значения внутренних КПД цилиндров турбины К-1000-60/1500 возьмем из таблицы источника [7, с.190]:

$$\eta_{oi}^{\text{ЦВД}} = 0,775; \eta_{oi}^{\text{ЦСД}} = 0,907; \eta_{oi}^{\text{ЦНД}} = 0,777.$$

ЦВД

Параметры пара до стопорно-регулирующего клапана ЦВД:

$$p_0 = 7 \text{ МПа}; t_0 = f(p_0) + 25 = 285,8 + 25 = 310,8^\circ\text{C}; h_0 = 2884 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

					ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		11

Учитывая потери давления в СРК:

$$p'_0 = 0,97 \cdot p_0 = 6,79 \text{ МПа};$$

$$s'_0 = f(p'_0, h_0) = 6,021 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{С}}.$$

Совместим конец расширения пара с четвертым отбором:

$$p_{\text{разд1}} = p_4 = 0,78 \text{ МПа};$$

$$h_{4t} = f(s'_0, p_4) = 2480 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Теоретический теплоперепад:

$$H_0^{\text{ЦВД}} = h_0 - h_{4t} = 2884 - 2480 = 404 \text{ кДж/кг}.$$

Действительный теплоперепад:

$$H_i^{\text{ЦВД}} = \eta_{oi}^{\text{ЦВД}} \cdot H_0^{\text{ЦВД}} = 0,775 \cdot 404 = 313 \text{ кДж/кг}.$$

Действительная энтальпия на выходе из ЦВД:

$$h_4 = h_0 - H_i^{\text{ЦВД}} = 2884 - 313 = 2571 \text{ кДж/кг};$$

$$x_4 = f(p_4, h_4) = 0,855; y_4 = 1 - 0,855 = 0,145.$$

$y_4 < y_{\text{доп}} = 0,15$ – не превышает допустимое значение конечной влажности пара в ЦВД.

ЦСД

Далее пар попадает на осушку в сепаратор. Потери давления пара на трение по паропроводу до сепаратора составляют 3%, поэтому давление на входе в сепаратор:

$$p_{c1} = 0,97 \cdot p_{\text{разд1}} = 0,97 \cdot 0,78 = 0,757 \text{ МПа}.$$

Потери давления в сепараторе составляют 6%, поэтому давление на выходе из сепаратора:

$$p'_{c1} = 0,94 \cdot p_{c1} = 0,94 \cdot 0,757 = 0,71 \text{ МПа}.$$

После отсечного клапана давление падает на 4%:

$$p_0^{\text{ЦСД}} = 0,96 \cdot p'_{c1} = 0,96 \cdot 0,71 = 0,683 \text{ МПа};$$

$$h_0^{\text{ЦСД}} = f(p_0^{\text{ЦСД}}, x = 0,995) = 2751 \text{ кДж/кг};$$

$$s_0^{\text{ЦСД}} = 6,692 \text{ кДж/кг} \cdot ^\circ\text{С}.$$

					ФЮРА.XXXXXX.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		12

Совместим конец расширения пара с седьмым отбором:

$$h_{7t} = f(s_0^{\text{ЦСД}}, p_7) = 2411 \text{ кДж/кг.}$$

Теоретический теплоперепад:

$$H_0^{\text{ЦСД}} = h_0^{\text{ЦСД}} - h_{7t} = 2751 - 2411 = 340 \text{ кДж/кг.}$$

Действительный теплоперепад:

$$H_i^{\text{ЦСД}} = \eta_{oi}^{\text{ЦСД}} \cdot H_0^{\text{ЦСД}} = 0,907 \cdot 340 = 308 \text{ кДж/кг.}$$

Действительная энтальпия на выходе из ЦСД:

$$h_7 = h_0^{\text{ЦСД}} - H_i^{\text{ЦСД}} = 2751 - 308 = 2443 \text{ кДж/кг.}$$

$$x_7 = f(p_7, h_7) = 0,899; y_7 = 1 - 0,899 = 0,101.$$

$u_7 < u_{\text{доп}} = 0,15$ – не превышает допустимое значение конечной влажности пара в ЦСД.

ЦНД

Далее пар опять попадает на осушку в сепаратор. Потери давления пара на трение по паропроводу от выхода ЦСД до сепаратора составляют 3%, поэтому давление на входе в сепаратор:

$$p_{c2} = 0,97 \cdot p_{\text{разд2}} = 0,97 \cdot 0,0904 = 0,0877 \text{ МПа,}$$

$$p_{\text{разд2}} = p_7 = 0,0904 \text{ МПа.}$$

Потери давления в сепараторе составляют 6% от давления на входе в него, поэтому давление на выходе из сепаратора:

$$p'_{c2} = 0,94 \cdot p_{c2} = 0,94 \cdot 0,0877 = 0,0824 \text{ МПа.}$$

После стопорного клапана давление падает на 4%:

$$p_0^{\text{ЦНД}} = 0,96 \cdot p'_{c2} = 0,079 \text{ МПа;}$$

$$h_0^{\text{ЦНД}} = f(p_0^{\text{ЦНД}}, x = 0,995) = 2653 \text{ кДж/кг.}$$

Параметры пара перед ЦНД:

$$s_0^{\text{ЦНД}} = 7,407 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}.$$

Определяем давление пара p'_k на выходе из ЦНД с учетом потерь давления в выхлопном патрубке турбины, которая составляет 4% от p_k :

$$p'_k = 1,04 \cdot p_k = 1,04 \cdot 0,0035 = 0,00364 \text{ МПа.}$$

									Лист
									13
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ				

Энтальпия пара конца расширения:

$$h_{kt} = f(s_0^{\text{ЦНД}}, p'_k) = 2220 \text{ кДж/кг.}$$

Теоретический теплоперепад:

$$H_0^{\text{ЦНД}} = h_0^{\text{ЦНД}} - h_{kt} = 2653 - 2220 = 433 \text{ кДж/кг.}$$

Действительный теплоперепад:

$$H_i^{\text{ЦНД}} = \eta_{oi}^{\text{ЦНД}} \cdot H_0^{\text{ЦНД}} = 0,777 \cdot 433 = 336 \text{ кДж/кг.}$$

Действительная энтальпия на выходе из ЦНД:

$$h_k = h_0^{\text{ЦНД}} - H_i^{\text{ЦНД}} = 2653 - 336 = 2317 \text{ кДж/кг;}$$

$$x_k = f(p'_k, h_k) = 0,90; y_k = 1 - 0,904 = 0,096.$$

$y_k < y_{\text{доп}} = 0,13$ – не превышает допустимое значение конечной влажности пара в ЦНД.

Параметры потоков

Определим параметры в каждом отборе:

$$h_{1t} = f(p_1, s'_0) = 2770 \text{ кДж/кг;}$$

$$h_1 = h_0 - \eta_{oi}^{\text{ЦВД}} \cdot (h_0 - h_{1t}) = 2884 - 0,775 \cdot (2884 - 2770) = 2796 \text{ кДж/кг;}$$

$$h_2 = h_0 - \eta_{oi}^{\text{ЦВД}} \cdot (h_0 - h_{2t}) = 2884 - 0,775 \cdot (2884 - 2684) = 2729 \text{ кДж/кг;}$$

$$h_3 = h_0 - \eta_{oi}^{\text{ЦВД}} \cdot (h_0 - h_{3t}) = 2884 - 0,775 \cdot (2884 - 2593) = 2658 \text{ кДж/кг;}$$

$$h_4 = 2571 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}};$$

$$h_5 = h_0^{\text{ЦСД}} - \eta_{oi}^{\text{ЦСД}} \cdot (h_0^{\text{ЦСД}} - h_{5t}) = 2751 - 0,907(2751 - 2724) = 2727 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}};$$

$$h_6 = h_0^{\text{ЦСД}} - \eta_{oi}^{\text{ЦСД}} \cdot (h_0^{\text{ЦСД}} - h_{6t}) = 2751 - 0,907(2751 - 2572) = 2589 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}};$$

$$h_7 = 2443 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}};$$

$$h_8 = h_0^{\text{ЦНД}} - \eta_{oi}^{\text{ЦНД}} \cdot (h_0^{\text{ЦНД}} - h_{8t}) = 2653 - 0,777(2653 - 2482) = 2520 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

					ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		14

Энтальпии дренажей сепараторов:

$$h_{c1}' = f(p_{c1}, x = 0) = 711 \text{ кДж/кг};$$
$$h_{c2}' = f(p_{c2}, x = 0) = 402 \text{ кДж/кг}.$$

Энтальпии дренажей греющего пара:

$$h_1' = f(t_{s1}) = 1071 \text{ кДж/кг};$$
$$h_2' = f(t_{s2}) = 953 \text{ кДж/кг};$$
$$h_3' = f(t_{s3}) = 839 \text{ кДж/кг};$$
$$h_5' = f(t_{s5}) = 663 \text{ кДж/кг};$$
$$h_6' = f(t_{s6}) = 531 \text{ кДж/кг};$$
$$h_7' = f(t_{s7}) = 402 \text{ кДж/кг};$$
$$h_8' = f(t_{s8}) = 274 \text{ кДж/кг}.$$

Значения давлений питательной воды и основного конденсата приближенно определяются:

$$p_{пв} = 1,3 \dots 1,5 \cdot p_0 = 1,4 \cdot 7 = 9,8 \text{ МПа};$$
$$p_{ок} = 1,4 \dots 1,7 \cdot p_d = 1,5 \cdot 0,76 = 1,14 \text{ МПа}.$$

Энтальпия конденсата ОД определяется по температуре дренажа и давлению в подогревателе, идущего за ОД по ходу основного конденсата или питательной воды. Температура дренажа на выходе из ОД:

$$t_{од,j} = t_{ок,вх,j} + \Delta t_{од},$$

где $\Delta t_{од} = 10^\circ\text{C}$ – подогрев воды в охладителях дренажа.

$$t_{од7} = t_{ок8} + \Delta t_{од} = 63,5 + 10 = 73,5^\circ\text{C}; h_{др7} = f(p_{ок}, t_{од7}) = 309 \text{ кДж/кг};$$
$$t_{од5} = t_{ок6} + \Delta t_{од} = 124,5 + 10 = 134,5^\circ\text{C}; h_{др5} = f(p_{ок}, t_{од5}) = 566 \text{ кДж/кг};$$
$$t_{од3} = t_{пн} + \Delta t_{од} = 170 + 10 = 180^\circ\text{C}; h_{др3} = f(p_{пв}, t_{од3}) = 768 \text{ кДж/кг};$$
$$t_{од2} = t_{пв3} + \Delta t_{од} = 195 + 10 = 205^\circ\text{C}; h_{др2} = f(p_{пв}, t_{од2}) = 878 \text{ кДж/кг};$$
$$t_{од1} = t_{пв2} + \Delta t_{од} = 220 + 10 = 230^\circ\text{C}; h_{др1} = f(p_{пв}, t_{од1}) = 992 \text{ кДж/кг}.$$

Величина удельной работы одного килограмма пара, идущего в j -й отбор турбины, определяется по формуле:

$$H_j = h_0 - h_j.$$

					ФЮРА.XXXXXX.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		15

Величина удельной работы отбора из ЦВД:

$$H_j^{\text{ЦВД}} = h_0^{\text{ЦВД}} - h_j.$$

Величина удельной работы отбора из ЦСД:

$$H_j^{\text{ЦСД}} = h_0^{\text{ЦСД}} - h_j + H_i^{\text{ЦВД}}.$$

Величина удельной работы отбора из ЦНД:

$$H_j^{\text{ЦСД}} = h_0^{\text{ЦНД}} - h_j + H_i^{\text{ЦВД}} H_i^{\text{ЦСД}}.$$

$$H_1 = h_0 - h_1 = 2884 - 2796 = 88 \text{ кДж/кг};$$

$$H_2 = h_0 - h_2 = 2884 - 2729 = 155 \text{ кДж/кг};$$

$$H_3 = h_0 - h_3 = 2884 - 2658 = 226 \text{ кДж/кг};$$

$$H_4 = H_i^{\text{ЦВД}} = 313 \text{ кДж/кг};$$

$$H_5 = H_i^{\text{ЦВД}} + h_0^{\text{ЦСД}} - h_5 = 313 + 2751 - 2727 = 337 \text{ кДж/кг};$$

$$H_6 = H_i^{\text{ЦВД}} + h_0^{\text{ЦСД}} - h_6 = 313 + 2751 - 2589 = 475 \text{ кДж/кг};$$

$$H_7 = H_i^{\text{ЦВД}} + h_0^{\text{ЦСД}} - h_7 = 313 + 2751 - 2443 = 621 \text{ кДж/кг};$$

$$H_8 = H_i^{\text{ЦВД}} + H_i^{\text{ЦСД}} + h_0^{\text{ЦНД}} - h_8 = 313 + 308 + 2653 - 2520 = 754 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Величина коэффициентов недовыработки мощности паром, идущим в j отбор турбины, определяется по формуле:

$$y_j = \frac{H_i - H_j}{H_i},$$

где $H_i = H_i^{\text{ЦВД}} + H_i^{\text{ЦСД}} + H_i^{\text{ЦНД}} = 313 + 308 + 336 = 957 \text{ кДж/кг}$ — полный действительный использованный теплоперепад на турбину.

$$y_1 = \frac{H_i - H_1}{H_i} = \frac{957 - 88}{957} = 0,908;$$

$$y_2 = \frac{H_i - H_2}{H_i} = \frac{957 - 155}{957} = 0,838;$$

$$y_3 = \frac{H_i - H_3}{H_i} = \frac{957 - 226}{957} = 0,764;$$

$$y_4 = \frac{H_i - H_4}{H_i} = \frac{957 - 313}{957} = 0,673;$$

					ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		16

$$y_5 = \frac{H_i - H_5}{H_i} = \frac{957 - 337}{957} = 0,648;$$

$$y_6 = \frac{H_i - H_6}{H_i} = \frac{957 - 475}{957} = 0,504;$$

$$y_7 = \frac{H_i - H_7}{H_i} = \frac{957 - 621}{957} = 0,351;$$

$$y_8 = \frac{H_i - H_8}{H_i} = \frac{957 - 754}{957} = 0,212.$$

Действительный процесс расширения пара в hs-диаграмме представлен в приложении А.

1.1.4 Определение числа потоков

Число потоков в цилиндрах низкого давления зависит от номинальной электрической мощности и от предельной электрической мощности, определяется по формуле:

$$i = \frac{N_э}{N_э^{пред} \cdot \eta_m \cdot \eta_{эг}}$$

Предельная мощность зависит от многих факторов. Но, пожалуй, самым важным является то, на каких оборотах работает турбина, тихоходная с частотой вращения 25 Гц или быстроходная с частотой вращения 50 Гц. Предельная мощность определяется по формуле:

$$N_э^{пред} = \frac{k \cdot H_i \cdot [\sigma] \cdot c_2 \cdot m}{\rho_{мат} \cdot v_k \cdot 2\pi \cdot n^2},$$

где $\eta_m \cdot \eta_{эг} = 0,98$ – произведение механического КПД и КПД электрогенератора;

$H_i = 957$ кДж/кг – действительный срабатываемый теплоперепад в турбине;

					ФЮРА.XXXXXX.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		17

$\frac{\rho_{\text{мат}}}{[\sigma]} = 17,3 \text{ кг/м}^3 \cdot \text{МПа}$ – плотность стали, деленная на допускаемое

напряжение на растяжение;

$v_k = f(p'_k, h_k) = 34,4 \text{ м}^3/\text{кг}$ – удельный объем в конце расширения;

$m = 1,1$ – коэффициент, который учитывает влияние отборов, диапазон изменения 1,1...1,3;

$n = 25 \text{ с}^{-1}$ – частота вращения ротора генератора (по прототипу);

$\Delta H_{\text{вс}} = 20 \text{ кДж/кг}$ – потери с выходной скоростью (принимаем);

$c_2 = \sqrt{2000 \cdot \Delta H_{\text{вс}}} = 200 \text{ м/с}$ – скорость выхода потока;

$k = 2,3$ – коэффициент разгрузки, диапазон изменения 2,3...2,68.

Предельная мощность:

$$N_{\text{эпред}} = \frac{2,3 \cdot 957 \cdot 10^3 \cdot 200 \cdot 1,1}{17,3 \cdot 10^{-6} \cdot 34,4 \cdot 2\pi \cdot 25^2} = 207,2 \text{ МВт.}$$

Число потоков:

$$i = \frac{600}{207,2 \cdot 0,98} = 2,94 \approx 4.$$

Округление должно происходить до ближайшего большего четного числа. Теперь, когда известна структура турбоустановки, можно переходить к её иллюстрированию. Принципиальная тепловая схема проектируемого энергоблока представлена в приложении Б.

1.1.5 Расчет сетевой установки

Отпуск теплоты на отопление производится с помощью сетевых подогревателей. Число сетевых подогревателей равно трем. Температурный график теплосети 140/55. Тепловая нагрузка энергоблока 65 МВт:

$$z_{\text{псв}} = 3, t_{\text{пс}} = 140^\circ\text{C}, t_{\text{ос}} = 55^\circ\text{C}, Q_{\text{от}} = 300 \text{ МВт.}$$

Подключение ПСВ производим к отборам с ближайшими необходимыми параметрам пара (см. приложение Б):

$$p_5 = 0,59 \text{ МПа}; p_6 = 0,25 \text{ МПа}; p_7 = 0,0904 \text{ МПа.}$$

					ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		18

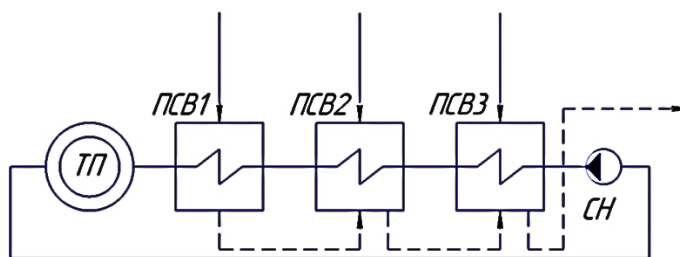


Рисунок 1.1.2 – Схема сетевой установки проектируемого энергоблока

Определяем давление и температуру насыщения в ПСВ с учетом потерь в трубопроводах:

$$\Delta p_{\text{тр}} = (0,05 - 0,08) \cdot p_{\text{отб}} [7];$$

$$p_{\text{ПСВ1}} = 0,95 \cdot p_5 = 0,95 \cdot 0,59 = 0,56 \text{ МПа};$$

$$t_s(p_{\text{ПСВ1}}) = 156,2 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Недогрев в сетевых подогревателях составляет 5 – 10 °С .

$$t_{\text{сп1}} = 156,2 - 6,2 = 150 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$p_{\text{ПСВ2}} = 0,95 \cdot p_6 = 0,95 \cdot 0,25 = 0,237 \text{ МПа};$$

$$t_s(p_{\text{ПСВ2}}) = 125,7^\circ\text{C};$$

$$t_{\text{сп2}} = 125,7 - 5,7 = 120 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$p_{\text{ПСВ3}} = 0,95 \cdot p_7 = 0,95 \cdot 0,0904 = 0,086 \text{ МПа};$$

$$t_s(p_{\text{ПСВ3}}) = 95,4^\circ\text{C};$$

$$t_{\text{сп3}} = 95,4 - 5,4 = 90^\circ\text{C}.$$

Общий расход сетевой воды определяется по формуле:

$$Q_{\text{от}} = G_{\text{св}} \cdot (h_{\text{пс}} - h_{\text{ос}});$$

$$G_{\text{св}} = \frac{Q_{\text{от}}}{h_{\text{пс}} - h_{\text{ос}}} = \frac{300 \cdot 10^3}{590 - 232} = 837,9 \frac{\text{кг}}{\text{с}},$$

где $h_{\text{пс}} = f(t_{\text{пс}}, p_{\text{псв}}) = 590 \text{ кДж/кг}$; $h_{\text{ос}} = f(t_{\text{ос}}, p_{\text{псв}}) = 232 \text{ кДж/кг}$;

$p_{\text{св}} = 1 \text{ МПа}$ – давление сетевой воды (1 – 1,5 МПа, [7]).

Энтальпия дренажа греющего пара:

$$h_{\text{дрсп1}} = f(p_{\text{ПСВ1}}, x = 0) = 659 \text{ кДж/кг}; h_{\text{сп1}} = f(p_{\text{св}}; t_{\text{сп1}}) = 633 \text{ кДж/кг};$$

$$h_{\text{дрсп2}} = f(p_{\text{ПСВ2}}, x = 0) = 528 \text{ кДж/кг}; h_{\text{сп2}} = f(p_{\text{св}}; t_{\text{сп2}}) = 505 \text{ кДж/кг};$$

$$h_{\text{дрсп3}} = f(p_{\text{ПСВ3}}, x = 0) = 400 \text{ кДж/кг}; h_{\text{сп3}} = f(p_{\text{св}}; t_{\text{сп3}}) = 378 \text{ кДж/кг}.$$

Уравнения материального и теплового баланса:

$$G_{\text{сп}} = G_{\text{сп1}} + G_{\text{сп2}} + G_{\text{сп3}}.$$

$$G_{\text{св1}} \cdot (h_{\text{сп1}} - h_{\text{сп2}}) = [G_{\text{сп1}} \cdot (h_5 - h_{\text{дрсп1}})] \cdot \eta_{\text{сп}};$$

$$G_{\text{св}} = G_{\text{св1}} + G_{\text{св2}};$$

$$G_{\text{св2}} \cdot h_{\text{сп2}} + G_{\text{св1}} \cdot h_{\text{сп1}} = G_{\text{св}} \cdot h_{\text{пс}};$$

$$G_{\text{св}} \cdot (h_{\text{сп2}} - h_{\text{сп3}}) = [G_{\text{сп1}} \cdot (h_{\text{дрсп1}} - h_{\text{дрсп2}}) + G_{\text{сп2}} \cdot (h_6 - h_{\text{дрсп2}})] \cdot \eta_{\text{сп}};$$

$$G_{\text{св}} \cdot (h_{\text{сп3}} - h_{\text{ос}}) = [G_{\text{сп2}} \cdot (h_{\text{дрсп2}} - h_{\text{дрсп3}}) + G_{\text{сп3}} \cdot (h_7 - h_{\text{дрсп3}})] \cdot \eta_{\text{сп}}.$$

Объединим полученные уравнения в систему и подставим известные величины.

$$\left\{ \begin{array}{l} G_{\text{св1}} \cdot (633 - 505) = [G_{\text{сп1}} \cdot (2727 - 659)] \cdot 0,98 \\ G_{\text{сп}} = G_{\text{сп1}} + G_{\text{сп2}} + G_{\text{сп3}}; \\ G_{\text{св1}} + G_{\text{св2}} = 151,6; \\ G_{\text{св2}} \cdot 505 + G_{\text{св1}} \cdot 633 = G_{\text{св}} \cdot 590; \\ G_{\text{св}} \cdot (505 - 378) = [G_{\text{сп1}} \cdot (659 - 528) + G_{\text{сп2}} \cdot (2589 - 528)] \cdot 0,98; \\ G_{\text{св}} \cdot (378 - 232) = [G_{\text{сп2}} \cdot (528 - 400) + G_{\text{сп3}} \cdot (2443 - 400)] \cdot 0,98. \end{array} \right.$$

Решив систему в Wolfram Mathematica 11, получим:

$$\left\{ \begin{array}{l} G_{\text{сп1}} = 35,14 \text{ кг/с}; \\ G_{\text{сп2}} = 50,45 \text{ кг/с}; \\ G_{\text{сп3}} = 59,32 \text{ кг/с}; \\ G_{\text{сп}} = 144,91 \text{ кг/с}. \end{array} \right.$$

Предварительная оценка расхода пара на турбину:

$$G'_0 = k_p \cdot \frac{N_э \cdot 10^3}{H_i \cdot \eta_m \cdot \eta_{эГ}} = 1,4 \cdot \frac{300 \cdot 10^3}{957 \cdot 0,98 \cdot 0,99} = 959 \text{ кг/с},$$

где k_p – коэффициент регенерации, принимаем $k_p = 1,4$ (1,15 до 1,4).

Тогда доля пара на сетевые подогреватели:

$$\alpha_{\text{сп1}} = \frac{G_{\text{сп1}}}{G'_0} = \frac{35,14}{1206} = 0,03664;$$

$$\alpha_{\text{сп2}} = \frac{G_{\text{сп2}}}{G'_0} = \frac{50,45}{1206} = 0,05260;$$

$$\alpha_{\text{сп3}} = \frac{G_{\text{сп3}}}{G'_0} = \frac{59,32}{1206} = 0,06185;$$

$$\alpha_{\text{сп}} = \alpha_{\text{сп1}} + \alpha_{\text{сп2}} + \alpha_{\text{сп3}} = 0,03664 + 0,05260 + 0,06185 = 0,15109.$$

					ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		20

1.1.6 Температурный график теплосети

Отпуск теплоты на отопление зависит от температуры наружного воздуха. Для различных климатических районов установлены и приведены в климатическом справочнике [9, с.433] значения расчетной температуры наружного воздуха $t_{\text{нв}}^{\text{р}}$, средней температуры отопительного периода $t_{\text{нв}}^{\text{ср}}$, продолжительности отопительного сезона $\tau_{\text{ос}}$, продолжительности удержания температур наружного воздуха и др. Изменение отопительной нагрузки в зависимости от температуры наружного воздуха представляется как

$$Q_{\text{от}} = f(t_{\text{нв}}).$$

Для города Норильск расчетная температура наружного воздуха имеет значение $t_{\text{нв}}^{\text{р}} = -40$ °С, расчетная температура воздуха внутри помещений должна быть $t_{\text{вн}}^{\text{р}} = 18$ °С. Имея все необходимые значения температур, построим график (см. рисунок 1.1.3).

					<i>ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		21

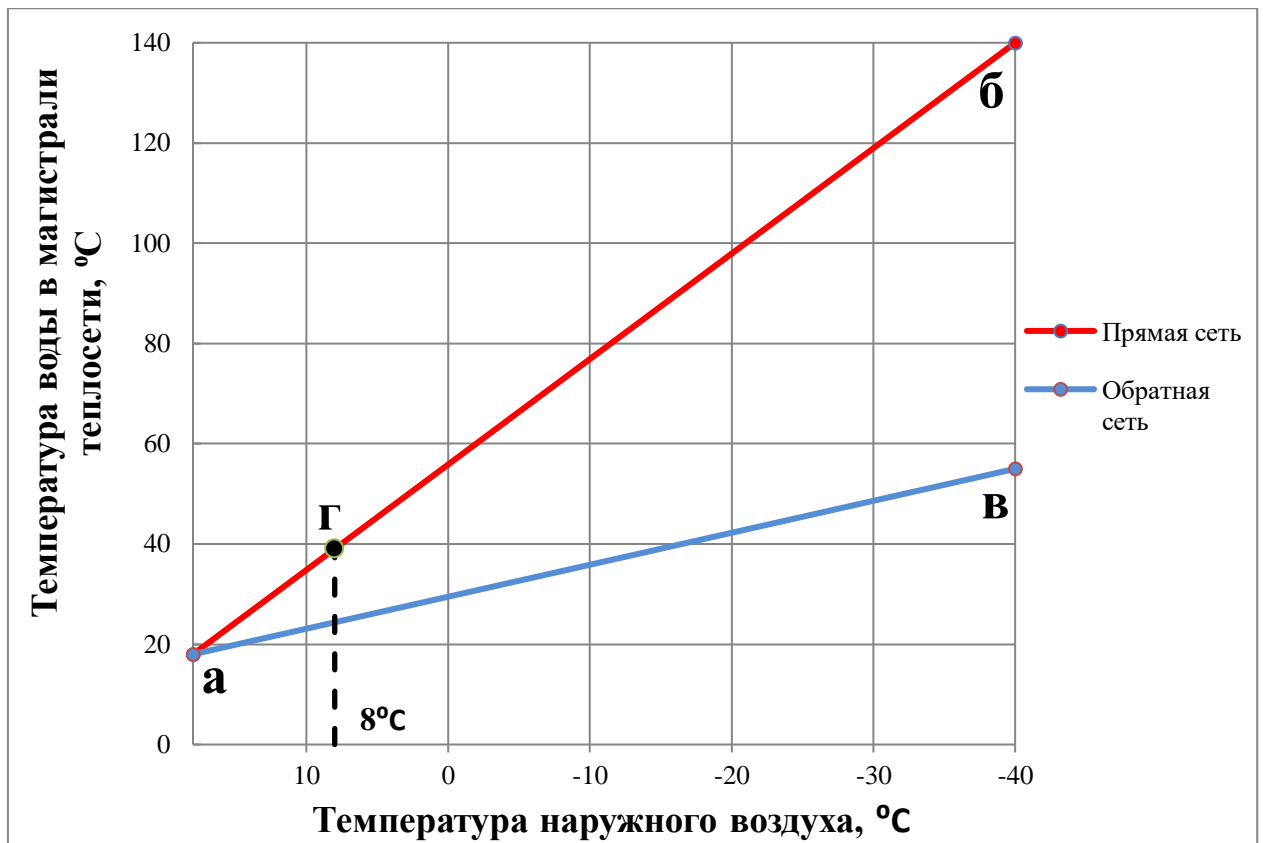


Рисунок 1.1.3 – Температурный график теплосети

Точка «а» – температура наружного воздуха равна температуре в помещении равно 18°C . Точка «б» – расчетная температура наружного воздуха составляет -40°C , температура прямой воды максимальная и составляет 140°C . Точка «в» – расчетная температура наружного воздуха составляет -40°C , температура обратной воды максимальная и составляет 55°C . Точка «г» – момент включения отопления при температуре наружного воздуха 8°C .

1.1.7 Уравнения материальных и тепловых балансов

Составим и решим уравнения материальных и тепловых балансов всех элементов схемы. Относительные расходы, принятые в расчете, взяты из источника [7].

Материальный баланс по пару. Относительный расход пара на турбину $\alpha_0 = 1$. Относительный расход пара из парогенератора в общем случае равен:

$$\alpha_{\text{пг}} = \alpha_0 + \alpha_{\text{упл}} + \alpha_{\text{ут}} = 1 + 0,01 + 0,005 = 1,015,$$

где $\alpha_{\text{ут}} = 0,005$ – относительный расход пара на утечки;

$\alpha_{\text{упл}} = 0,01$ – относительный расход пара на уплотнения.

Материальный баланс по воде. Относительный расход питательной воды в парогенераторе:

$$\alpha_{\text{пв}} = \alpha_{\text{пг}} + \alpha_{\text{пр}} = 1,015 + 0,02 = 1,035,$$

где $\alpha_{\text{пр}} = 0,02$ – относительный расход воды на продувку.

Материальный баланс добавочной воды. Относительный расход добавочной воды, компенсирующей потери рабочего тела на АЭС, принимаем равным относительному расходу рабочего тела на утечки:

$$\alpha_{\text{дв}} = \alpha_{\text{ут}} = 0,005.$$

Расширитель непрерывной продувки (РП). Цель расчета расширителя заключается в определении относительных расходов пара α_p и воды α_v по принятому расходу продувочной воды $\alpha_{\text{пр}}$ на основе решения уравнений материального и теплового балансов. Наглядная схема с расходами и энтальпиями представлена на рисунке 1.1.4.

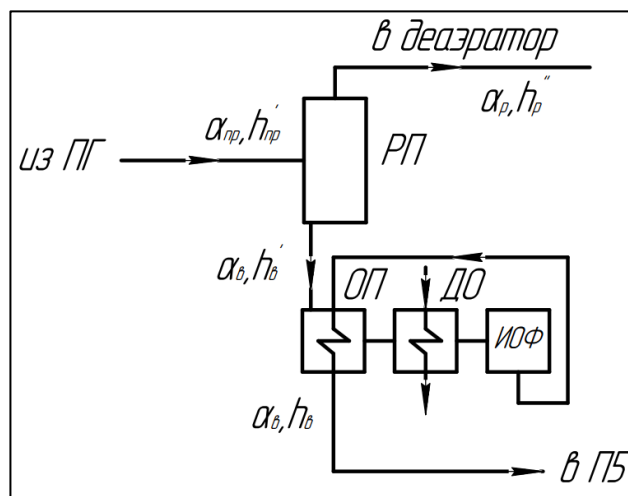


Рисунок 1.1.4 – Схема системы продувки парогенератора

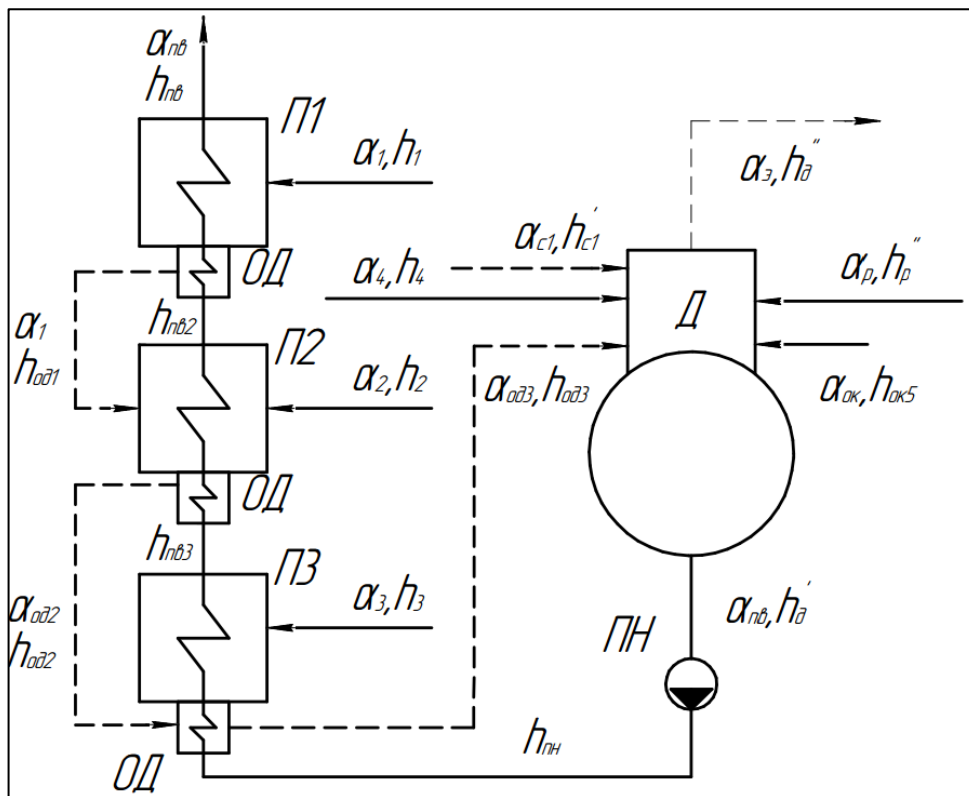


Рисунок 1.1.5 – Расстановка параметров потоков в тракте высокого давления

П1:

$$\eta_{\text{п}} \cdot \alpha_1 \cdot (h_1 - h_{\text{од1}}) = \alpha_{\text{пв}} \cdot (h_{\text{пв1}} - h_{\text{пв2}}),$$

$\eta_{\text{п}}$ – КПД поверхностного подогревателя, примем 0,98 [7, с.220].

П2:

$$\begin{cases} \eta_{\text{п}} \cdot (\alpha_1 \cdot (h_{\text{од1}} - h_{\text{од2}}) + \alpha_2 \cdot (h_2 - h_{\text{од2}})) = \alpha_{\text{пв}} \cdot (h_{\text{пв2}} - h_{\text{пв3}}); \\ \alpha_{\text{од2}} = \alpha_1 + \alpha_2. \end{cases}$$

П3:

$$\begin{cases} \eta_{\text{п}} \cdot (\alpha_{\text{од2}} \cdot (h_{\text{од2}} - h_{\text{од3}}) + \alpha_3 \cdot (h_3 - h_{\text{од3}})) = \alpha_{\text{пв}} \cdot (h_{\text{пв3}} - h_{\text{пн}}); \\ \alpha_{\text{од3}} = \alpha_{\text{од2}} + \alpha_3. \end{cases}$$

Д:

$$\begin{cases} \eta_{\text{с}} \cdot (\alpha_{\text{од3}} \cdot h_{\text{од3}} + \alpha_4 \cdot h_4 + \alpha_{\text{с1}} \cdot h'_{\text{с1}} + \alpha_{\text{р}} \cdot h''_{\text{р}} + \alpha_{\text{ок}} \cdot h_{\text{ок5}}) = \alpha_{\text{пв}} \cdot h'_d + \alpha_3 \cdot h''_d; \\ \alpha_{\text{пв}} = \alpha_{\text{ок}} + \alpha_4 + \alpha_{\text{с1}} + \alpha_{\text{р}} + \alpha_{\text{од3}} - \alpha_3. \end{cases}$$

$\eta_{\text{с}}$ – КПД смешивающего подогревателя, примем 0,99 [7, с.221];

α_3 – относительный расход пара на эжекторы.

Принимается: 0,002 – 0,003 [7, с.217]. Примем $\alpha_3 = 0,003$.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

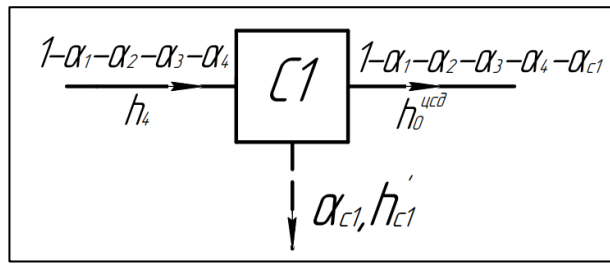


Рисунок 1.1.6 – Расстановка энтальпий и расходов потоков у первого сепаратора

$$\eta_c \cdot h_4 \cdot (1 - \alpha_1 - \alpha_2 - \alpha_3 - \alpha_4) =$$

$$= h_0^{\text{исд}} \cdot (1 - \alpha_1 - \alpha_2 - \alpha_3 - \alpha_4 - \alpha_{c1}) + h'_{c1} \cdot \alpha_{c1}$$

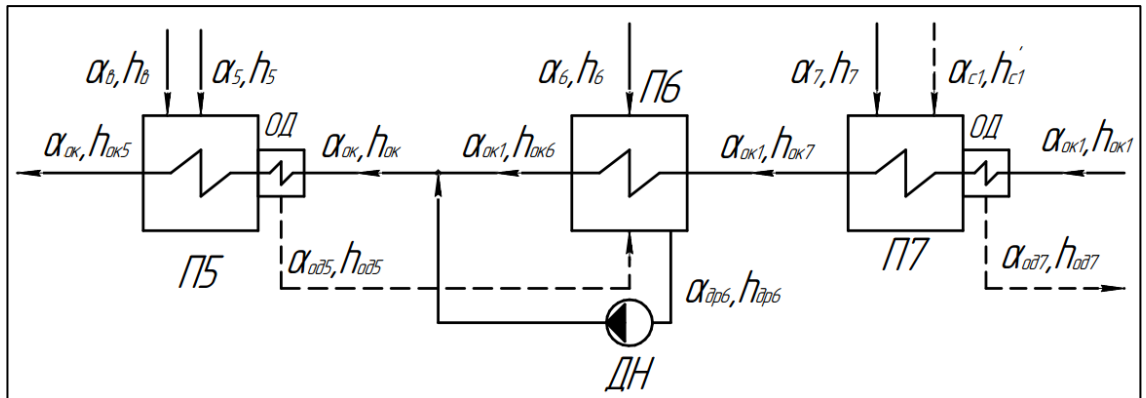


Рисунок 1.1.7 – Расстановка параметров потоков в тракте низкого давления

П5:

$$\begin{cases} \eta_{\text{п}} \cdot (\alpha_5 \cdot (h_5 - h_{\text{од5}}) + \alpha_{\text{в}} \cdot (h_{\text{в}} - h_{\text{од5}})) = \alpha_{\text{ок}} \cdot (h_{\text{ок5}} - h_{\text{ок}}); \\ \alpha_{\text{од5}} = \alpha_5 + \alpha_{\text{в}}. \end{cases}$$

Точка смешения:

$$\alpha_{\text{ок}} \cdot h_{\text{ок}} = \alpha_{\text{ок1}} \cdot h_{\text{ок6}} + \alpha_{\text{др6}} \cdot h_{\text{др6}};$$

$$\alpha_{\text{ок}} = \alpha_{\text{ок1}} + \alpha_{\text{др6}}.$$

П6:

$$\begin{cases} \eta_{\text{п}} \cdot (\alpha_6 \cdot (h_6 - h_{\text{др6}}) + \alpha_{\text{од5}} \cdot (h_{\text{од5}} - h_{\text{др6}})) = \alpha_{\text{ок1}} \cdot (h_{\text{ок6}} - h_{\text{ок7}}); \\ \alpha_{\text{др6}} = \alpha_{\text{од5}} + \alpha_6. \end{cases}$$

П7:

$$\begin{cases} \eta_c \cdot (\alpha_7 \cdot (h_7 - h_{\text{од7}}) + \alpha_{c2} \cdot (h'_{c2} - h_{\text{од7}})) = \alpha_{\text{ок1}} \cdot (h_{\text{ок7}} - h_{\text{ок1}}); \\ \alpha_{\text{од7}} = \alpha_7 + \alpha_{c2}. \end{cases}$$

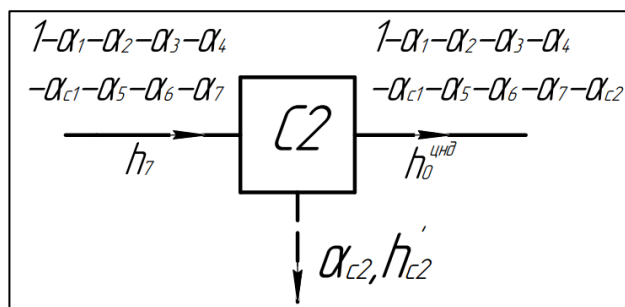


Рисунок 1.1.8 – Расстановка энтальпий и расходов потоков у второго сепаратора

$$\eta_c \cdot h_7 \cdot (1 - \alpha_1 - \alpha_2 - \alpha_3 - \alpha_4 - \alpha_{c1} - \alpha_5 - \alpha_6 - \alpha_7) =$$

$$= h_0^{\text{цнд}} \cdot (1 - \alpha_1 - \alpha_2 - \alpha_3 - \alpha_4 - \alpha_{c1} - \alpha_5 - \alpha_6 - \alpha_7 - \alpha_{c2}) + h'_{c2} \cdot \alpha_{c2}.$$

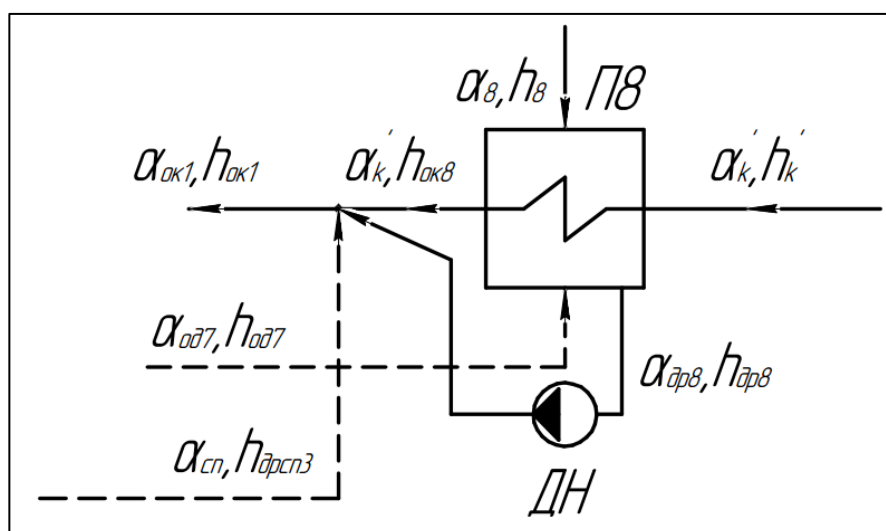


Рисунок 1.1.9 – Расстановка параметров потоков у восьмого подогревателя

П8:

$$\begin{cases} \eta_{\text{п}} \cdot (\alpha_8 \cdot (h_8 - h_{\text{др8}}) + \alpha_{\text{од7}} \cdot (h_{\text{од7}} - h_{\text{др8}})) = \alpha'_k \cdot (h_{\text{ок8}} - h'_k); \\ \alpha_{\text{др8}} = \alpha_8 + \alpha_{\text{од7}}. \end{cases}$$

Точка смешения:

$$\alpha_{\text{ок1}} \cdot h_{\text{ок1}} = \alpha'_k \cdot h_{\text{ок8}} + \alpha_{\text{др8}} \cdot h_{\text{др8}} + \alpha_{\text{сп}} \cdot h_{\text{дрспз}};$$

$$\alpha_{\text{ок1}} = \alpha'_k + \alpha_{\text{др8}} + \alpha_{\text{сп}}.$$

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
------	------	----------	---------	------

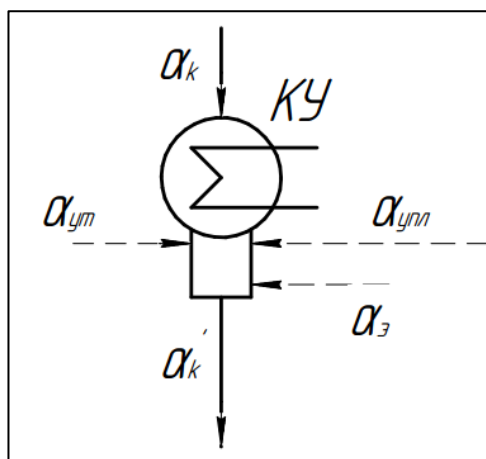


Рисунок 1.1.10 – Расстановка расходов потоков у конденсационной установки

Материальный баланс в конденсаторе:

$$\alpha'_k = \alpha_k + \alpha_э + \alpha_{упл} + \alpha_{ут},$$

где $\alpha_k = 1 - \alpha_1 - \alpha_2 - \alpha_3 - \alpha_4 - \alpha_{c1} - \alpha_5 - \alpha_6 - \alpha_7 - \alpha_8 - \alpha_{c2} - \alpha_{сп}$.

Произведем расчёт полученной системы уравнений (след. стр.) в программе Wolfram Mathematica 11. Информация в учебном пособии [7] гласит: Достаточная точность расчета обеспечивается при определении α_j с точностью до четырех знаков после запятой. Руководствуясь этим, представим результаты расчета в виде таблицы, округлив энтальпии до целых значений.

Таблица 1.1.1 – Результаты вычислений системы уравнений

Неизвестная величина	Результат	Неизвестная величина	Результат	Неизвестная величина	Результат
α_1	0,0679	α_6	0,0407	$\alpha_{ок}$	0,7550
α_2	0,0597	α_7	0,0382	$\alpha_{ок1}$	0,6536
α_3	0,0607	α_8	0,0248	$h_{ок}$	525
α_4	0,0195	α_{c1}	0,0699	$h_{ок1}$	206
α_5	0,0459	α_{c2}	0,0024	α'_k	0,4371

$$\begin{aligned}
& 0,98 \cdot \alpha_1 \cdot (2796 - 992) = 1,035 \cdot (1062 - 946) \\
& 0,98 \cdot (\alpha_1 \cdot (992 - 878) + \alpha_2 \cdot (2729 - 878)) = 1,035 \cdot (946 - 834) \\
& \quad \alpha_{од2} = \alpha_1 + \alpha_2 \\
& 0,98 \cdot (\alpha_{од2} \cdot (878 - 768) + \alpha_3 \cdot (2658 - 768)) = 1,035 \cdot (834 - 712) \\
& \quad \alpha_{од3} = \alpha_{од2} + \alpha_3 \\
& 0,99 \cdot (\alpha_{од3} \cdot 768 + \alpha_4 \cdot 2571 + \alpha_{с1} \cdot 711 + 0,0052 \cdot 2773 + \alpha_{ок} \cdot 654) = \\
& \quad = 1,035 \cdot 712 + 0,003 \cdot 2766 \\
& \quad 1,035 = \alpha_{ок} + \alpha_4 + \alpha_{с1} + \alpha_{од3} + 0,0052 - 0,003 \\
& 2571(1 - \alpha_1 - \alpha_2 - \alpha_3 - \alpha_4) = \alpha_{с1} \cdot 711 + (1 - \alpha_1 - \alpha_2 - \alpha_3 - \alpha_4 - \alpha_{с1})2751 \\
& 0,98 \cdot (\alpha_5 \cdot (2727 - 566) + 0,0148 \cdot (587 - 566)) = \alpha_{ок} \cdot (654 - h_{ок}) \\
& \quad \alpha_{од5} = 0,0148 + \alpha_5 \\
& \quad \alpha_{ок} \cdot h_{ок} = \alpha_{ок1} \cdot 524 + \alpha_{др6} \cdot 531 \\
& \quad \alpha_{ок} = \alpha_{ок1} + \alpha_{др6} \\
& 0,98 \cdot (\alpha_6 \cdot (2589 - 531) + \alpha_{од5} \cdot (566 - 531)) = \alpha_{ок1} \cdot (524 - 395) \\
& \quad \alpha_{др6} = \alpha_{од5} + \alpha_6 \\
& 0,99 \cdot (\alpha_7 \cdot (2443 - 309) + \alpha_{с2} \cdot (402 - 309)) = \alpha_{ок1} \cdot (395 - h_{ок1}) \\
& \quad \alpha_{од7} = \alpha_7 + \alpha_{с2} \\
& \quad 2443 \cdot (1 - \alpha_1 - \alpha_2 - \alpha_3 - \alpha_4 - \alpha_{с1} - \alpha_5 - \alpha_6 - \alpha_7) = \\
& = \alpha_{с2} \cdot 402 + (1 - \alpha_1 - \alpha_2 - \alpha_3 - \alpha_4 - \alpha_{с1} - \alpha_5 - \alpha_6 - \alpha_7 - \alpha_{с2}) \cdot 2653 \\
& 0,98 \cdot (\alpha_8 \cdot (2520 - 274) + \alpha_{од7} \cdot (309 - 274)) = \alpha'_к \cdot (267 - 139) \\
& \quad \alpha_{др8} = \alpha_{од7} + \alpha_8 \\
& \quad \alpha_{ок1} \cdot h_{ок1} = \alpha'_к \cdot 267 + \alpha_{др8} \cdot 274 + \alpha_{сп} \cdot 400 \\
& \quad \alpha_{ок1} = \alpha'_к + \alpha_{др8} + \alpha_{сп}
\end{aligned}$$

Проверка баланса по пару:

$$\begin{aligned}
\alpha_k &= 1 - \alpha_1 - \alpha_2 - \alpha_3 - \alpha_4 - \alpha_{с1} - \alpha_5 - \alpha_6 - \alpha_7 - \alpha_{с2} - \alpha_8 - \alpha_{сп} = \\
&= 1 - 0,0679 - 0,0597 - 0,0607 - 0,0195 - 0,0699 - 0,0459 - \\
&\quad - 0,0407 - 0,0382 - 0,0024 - 0,0248 - 0,02 = 0,4192.
\end{aligned}$$

Проверка баланса по воде:

$$\alpha_k = \alpha'_к - \alpha_э - \alpha_{упл} - \alpha_{ут} = 0,4371 - 0,003 - 0,01 - 0,005 = 0,4192$$

Оценим погрешность:

$$\delta_{\alpha_k^*} = \left| \frac{0,4192 - 0,4191}{0,4192} \right| \cdot 100\% = 0,02\%.$$

					ФЮРА.XXXXXX.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		29

1.1.8 Расчет показателей тепловой экономичности

Расход пара на турбину определяется по формуле:

$$G_0 = \frac{N_э \cdot 10^3}{H_i \cdot \eta_m \cdot \eta_r \cdot (1 - \sum(\alpha_j \cdot y_j) - \alpha_c \cdot y_c)}$$

где $\eta_m = 0,98$ – механический КПД паротурбинной установки;

$\eta_r = 0,99$ – КПД генератора;

α_j – относительный расход пара в j-ый отбор;

y_j – коэффициент недовыработки j-го отбора;

$N_э$ – электрическая мощность АЭС;

H_i – действительный теплоперепад на турбину, кДж/кг.

$$G_0 = \frac{600 \cdot 10^3}{957 \cdot 0,98 \cdot 0,99 \cdot (1 - 0,0679 \cdot 0,908 - 0,0597 \cdot 0,838 - 0,0607 \cdot 0,764 - 0,0195 \cdot 0,673 - 0,0459 \cdot 0,648 - 0,0407 \cdot 0,504 - 0,0382 \cdot 0,351 - 0,0319 \cdot 0,212 - 0,0699 \cdot 0,673 - 0,0024 \cdot 0,351 - 0,00527 \cdot 0,648 - 0,05260 \cdot 0,504 - 0,06185 \cdot 0,351)} = 1009 \text{ кг/с.}$$

Вспомним, что в подразделе, в котором считали сетевую установку, был рассчитан предварительный расход пара на турбину, значение которого составило 1206 кг/с. На данном этапе расчета, когда получена окончательная величина, следует сравнить принятое значение расхода и полученное.

Относительная погрешность расчета:

$$\delta_G = \left| \frac{G_0 - G'_0}{G_0} \right| \cdot 100\% = \left| \frac{1009 - 994}{1009} \right| \cdot 100\% = 1,48\%.$$

Величина относительной погрешности расчета составила меньше двух процентов, это означает, что полученный расход вполне приемлем. Если бы погрешность превысила два процента, пришлось бы пересчитывать схему на полученный расход свежего пара.

									Лист
									30
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ				

Расходы пара и воды в характерных точках:

$$G_{\text{пв}} = \alpha_{\text{пв}} \cdot G_0 = 1,035 \cdot 1009 = 1044 \text{ кг/с};$$

$$G_{\text{пг}} = \alpha_{\text{пг}} \cdot G_0 = 1,015 \cdot 1009 = 1024 \text{ кг/с};$$

$$G_{\text{ту}} = \alpha_0 \cdot G_0 = 1 \cdot 1009 = 1009 \text{ кг/с};$$

$$G_{\text{упл}} = \alpha_{\text{упл}} \cdot G_0 = 0,01 \cdot 1009 = 10,1 \text{ кг/с};$$

$$G_{\text{р}} = \alpha_{\text{р}} \cdot G_0 = 0,0052 \cdot 1009 = 5,2 \text{ кг/с};$$

$$G_{\text{в}} = \alpha_{\text{в}} \cdot G_0 = 0,0148 \cdot 1009 = 14,9 \text{ кг/с};$$

$$G_{\text{ут}} = G_{\text{дв}} = \alpha_{\text{ут}} \cdot G_0 = 0,005 \cdot 1009 = 5 \text{ кг/с};$$

$$G_{\text{э}} = \alpha_{\text{э}} \cdot G_0 = 0,003 \cdot 1009 = 3 \text{ кг/с};$$

$$G_{\text{пр}} = \alpha_{\text{пр}} \cdot G_0 = 0,02 \cdot 1009 = 20,2 \text{ кг/с};$$

$$G_1 = \alpha_1 \cdot G_0 = 0,0679 \cdot 1009 = 68,5 \text{ кг/с};$$

$$G_2 = \alpha_2 \cdot G_0 = 0,0597 \cdot 1009 = 60,2 \text{ кг/с};$$

$$G_3 = \alpha_3 \cdot G_0 = 0,0607 \cdot 1009 = 61,24 \text{ кг/с};$$

$$G_4 = \alpha_4 \cdot G_0 = 0,0195 \cdot 1009 = 19,7 \text{ кг/с};$$

$$G_{\text{с1}} = \alpha_{\text{с1}} \cdot G_0 = 0,0699 \cdot 1009 = 70,5 \text{ кг/с};$$

$$G_5 = \alpha_5 \cdot G_0 = 0,0459 \cdot 1009 = 46,3 \text{ кг/с};$$

$$G_6 = \alpha_6 \cdot G_0 = 0,0407 \cdot 1009 = 41,1 \text{ кг/с};$$

$$G_7 = \alpha_7 \cdot G_0 = 0,0382 \cdot 1009 = 38,5 \text{ кг/с};$$

$$G_{\text{с2}} = \alpha_{\text{с2}} \cdot G_0 = 0,0024 \cdot 1009 = 2,4 \text{ кг/с};$$

$$G_{\text{к}} = \alpha_{\text{к}} \cdot G_0 = 0,4192 \cdot 1009 = 423 \text{ кг/с};$$

$$G'_{\text{к}} = \alpha'_{\text{к}} \cdot G_0 = 0,4371 \cdot 1009 = 441 \text{ кг/с};$$

$$G_{\text{ок1}} = \alpha_{\text{ок1}} \cdot G_0 = 0,6536 \cdot 1009 = 659,5 \text{ кг/с};$$

$$G_{\text{ок}} = \alpha_{\text{ок}} \cdot G_0 = 0,755 \cdot 1009 = 761,8 \text{ кг/с};$$

$$G_{\text{од2}} = \alpha_{\text{од2}} \cdot G_0 = 0,1276 \cdot 1009 = 128,7 \text{ кг/с};$$

$$G_{\text{од3}} = \alpha_{\text{од3}} \cdot G_0 = 0,1883 \cdot 1009 = 190 \text{ кг/с};$$

$$G_{\text{од5}} = \alpha_{\text{од5}} \cdot G_0 = 0,0607 \cdot 1009 = 61,2 \text{ кг/с};$$

$$G_{\text{од7}} = \alpha_{\text{од7}} \cdot G_0 = 0,0406 \cdot 1009 = 41 \text{ кг/с};$$

$$G_{\text{др6}} = \alpha_{\text{др6}} \cdot G_0 = 0,1014 \cdot 1009 = 102,3 \text{ кг/с};$$

$$G_{\text{др8}} = \alpha_{\text{др8}} \cdot G_0 = 0,0654 \cdot 1009 = 66 \text{ кг/с}.$$

					ФЮРА.XXXXXX.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		31

Расчет показателей тепловой экономичности. Показатели и порядок расчета зависят от типа электростанции (ТЭС или АЭС) и вида паротурбинной установки (конденсационная или теплофикационная).

Определим тепловую нагрузку всех парогенераторов:

$$Q_{\text{пг}} = G_{\text{пг}} \cdot (h_0 - h_{\text{пв}}) + G_{\text{пр}} \cdot (h'_{\text{пр}} - h_{\text{пв}}) =$$

$$= 1024 \cdot (2884 - 1062) + 20,2 \cdot (1267 - 1062) = 1870 \text{ МВт},$$

где $h_{\text{пв}} = h_{\text{пв1}} = 1062 \text{ кДж/кг}$.

Определим полную тепловую нагрузку турбоустановки:

$$Q_{\text{ту}} = G_0 \cdot \left[(\alpha_{\text{ту}} + \alpha_{\text{упл}}) \cdot (h_0 - h_{\text{пв}}) + \alpha_{\text{дв}} \cdot (h'_k - h_{\text{пв}}) + \right. \\ \left. + \alpha_{\text{р}} \cdot (h''_{\text{р}} - h_{\text{пв}}) + \alpha_{\text{в}} \cdot (h_{\text{в}} - h_{\text{пв}}) \right] =$$

$$= 1009 \cdot \left[(1 + 0,01) \cdot (2884 - 1062) + 0,005 \cdot (139 - 1062) + \right. \\ \left. + 0,0052 \cdot (2773 - 1062) + 0,0148 \cdot (587 - 1062) \right] =$$

$$= 1835,7 \text{ МВт}.$$

Тепловая нагрузка турбоустановки по производству электроэнергии:

$$Q_{\text{ту}}^{\text{э}} = Q_{\text{ту}} - Q_{\text{от}}/\eta_{\text{сп}} = 1837,5 - 300/0,98 = 1531,4 \text{ МВт}$$

КПД турбоустановки по производству электроэнергии:

$$\eta_{\text{ту}}^{\text{э}} = \frac{N_{\text{э}}}{Q_{\text{ту}}^{\text{э}}} = \frac{600}{1531,4} = 0,391.$$

Транспортный КПД:

$$\eta_{\text{тр}} = \frac{Q_{\text{ту}}}{Q_{\text{пг}}} = \frac{1837,5}{1870} = 0,983.$$

КПД станции (энергоблока) по отпуску электроэнергии (нетто):

$$\eta_{\text{с}}^{\text{э}} = \eta_{\text{ту}}^{\text{э}} \cdot \eta_{\text{пгу}} \cdot \eta_{\text{тр}} \cdot (1 - k_{\text{сн}}) = 0,391 \cdot 0,965 \cdot 0,983 \cdot (1 - 0,05) = 0,352;$$

$$\eta_{\text{пгу}} = \eta_{\text{ру}} \cdot \eta_{\text{тр1}} \cdot \eta_{\text{пг}} = 0,99 \cdot 0,995 \cdot 0,98 = 0,965;$$

$\eta_{\text{ру}} = 0,99$ – КПД реакторной установки;

$\eta_{\text{тр1}} = 0,995$ – КПД трубопроводов 1-го контура;

$\eta_{\text{пг}} = 0,98$ – КПД парогенератора.

$k_{\text{сн}}$ – удельный расход энергии на собственные нужды. Для двухконтурных АЭС принимается равным 0,05 – 0,055. Примем $k_{\text{сн}} = 0,05$ [7, с.227].

					ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		32

Удельный расход выгоревшего ядерного горючего на отпуск электроэнергии:

$$b_{\text{яг}}^* = \frac{0,0537}{\eta_c^a} = \frac{0,0537}{0,352} = 0,152 \frac{\text{г}}{\text{МВт} \cdot \text{ч}}$$

Удельный расход ядерного горючего (природного урана) на АЭС:

$$b_{\text{яг}} = \frac{1000}{\eta_c^a \cdot 24 \cdot \bar{B}} \cdot \frac{x_{\text{н}} - x_0}{x_e - x_0} = \frac{1000}{0,35 \cdot 24 \cdot 40 \cdot 10^3} \cdot \frac{5 - 0,25}{0,71 - 0,26} = 0,0312 \frac{\text{г}}{\text{кВт} \cdot \text{ч}}$$

где $\bar{B} = 30 \dots 40 \cdot 10^3 \frac{\text{МВт} \cdot \text{сут}}{\text{т}}$ – глубина выгорания топлива для АЭС с ВВЭР;

$x_{\text{н}}, x_e, x_0$ – содержание урана-235 в свежем, природном и отвальном уране, для АЭС с ВВЭР принимаем: $x_{\text{н}} = 3,5 \dots 5\%$, $x_e = 0,71\%$, $x_0 = 0,26\%$.

КПД блока по отпуску теплоты:

$$\eta_c^T = \eta_{\text{пгу}} \cdot \eta_{\text{тр}} \cdot \eta_{\text{сп}} = 0,965 \cdot 0,983 \cdot 0,98 = 0,93.$$

Удельный расход условного топлива на отпуск теплоты:

$$b_{\text{т}}^{\text{отп}} = \frac{0,0150}{\eta_c^T} = \frac{0,0150}{0,93} = 0,016 \frac{\text{г у. т.}}{\text{ГДж}}$$

1.2 Выбор тепломеханического оборудования

Задачи подраздела: выбор оборудования, соответствующего параметрам сред тепловой схемы энергоблока, а именно – выбор питательных насосов, конденсатных насосов, дренажных насосов, выбор сетевого насоса, деаэратора, выбор регенеративных и сетевых подогревателей. Выбор оборудования производится с запасом, с учетом того, что станция сможет работать и в конденсационном режиме.

1.2.1 Выбор теплообменников

Рассмотрим выбор регенеративных и сетевых подогревателей. Необходимо по расходу нагреваемой среды, параметрам нагреваемой среды и пара отбора определить площадь поверхности нагрева, задавшись

					ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		33

коэффициентом теплопередачи k в пределах по рекомендации от 3 до $4 \frac{\text{кВт}}{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}$.

Примем меньшее число диапазона, для запаса по площади.

$$Q_{\text{сп3}} = G_{\text{св}} \cdot (h_{\text{сп3}} - h_{\text{ос}}) = 837,9 \cdot (272 - 232) = 33,5 \text{ МВт};$$

$$\Delta t_{\text{б.сп3}} = t_{\text{s.сп3}} - t_{\text{ос}} = 64,9 - 55 = 10 \text{ °C};$$

$$\Delta t_{\text{м.сп3}} = t_{\text{s.сп3}} - t_{\text{сп3}} = 64,9 - 60 = 5 \text{ °C};$$

$$\Delta t_{\text{ср.сп3}} = \frac{\Delta t_{\text{б.сп3}} - \Delta t_{\text{м.сп3}}}{\ln (\Delta t_{\text{б.сп3}} / \Delta t_{\text{м.сп3}})} = \frac{10 - 5}{\ln (10/5)} = 7,2 \text{ °C};$$

$$F_{\text{сп3}} = \frac{Q_{\text{сп3}}}{k \cdot \Delta t_{\text{ср.сп3}}} = \frac{33,5 \cdot 10^3}{3 \cdot 7,2} = 1551 \text{ м}^2.$$

$$Q_{\text{сп2}} = G_{\text{св}} \cdot (h_{\text{сп2}} - h_{\text{сп3}}) = 837,9 \cdot (378 - 252) = 105,6 \text{ МВт};$$

$$\Delta t_{\text{б.сп2}} = t_{\text{s.сп2}} - t_{\text{сп3}} = 95,4 - 60 = 35,4 \text{ °C};$$

$$\Delta t_{\text{м.сп2}} = t_{\text{s.сп2}} - t_{\text{сп2}} = 95,4 - 90 = 5,4 \text{ °C};$$

$$\Delta t_{\text{ср.сп2}} = \frac{\Delta t_{\text{б.сп2}} - \Delta t_{\text{м.сп2}}}{\ln (\Delta t_{\text{б.сп2}} / \Delta t_{\text{м.сп2}})} = \frac{35,4 - 5,4}{\ln (35,4/5,4)} = 16 \text{ °C};$$

$$F_{\text{сп2}} = \frac{Q_{\text{сп2}}}{k \cdot \Delta t_{\text{ср.сп2}}} = \frac{105,6 \cdot 10^3}{3 \cdot 16} = 2200 \text{ м}^2.$$

$$Q_{\text{сп1}} = G_{\text{св}} \cdot (h_{\text{сп1}} - h_{\text{сп2}}) = 837,9 \cdot (590 - 378) = 177,6 \text{ МВт};$$

$$\Delta t_{\text{б.сп1}} = t_{\text{s.сп1}} - t_{\text{сп2}} = 125,7 - 90 = 35,7 \text{ °C};$$

$$\Delta t_{\text{м.сп1}} = t_{\text{s.сп1}} - t_{\text{сп1}} = 125,7 - 140 = 16,2 \text{ °C};$$

$$\Delta t_{\text{ср.сп1}} = \frac{\Delta t_{\text{б.сп1}} - \Delta t_{\text{м.сп1}}}{\ln (\Delta t_{\text{б.сп1}} / \Delta t_{\text{м.сп1}})} = \frac{36,2 - 16,2}{\ln (36,2/16,2)} = 6,7 \text{ °C};$$

$$F_{\text{сп1}} = \frac{Q_{\text{сп1}}}{k \cdot \Delta t_{\text{ср.сп1}}} = \frac{177,6 \cdot 10^3}{3 \cdot 6,7} = 3543,4 \text{ м}^2.$$

Из каталога [14], ориентируясь на площадь поверхности нагрева, произведем выбор сетевых подогревателей. Выбранное оборудование представлено в таблице 1.2.1.

					<i>ФЮРА.XXXXXXX.001 ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		34

Таблица 1.2.1 – Результат выбора сетевых подогревателей

Расчетные характеристики				
Позиция	$F, \text{ м}^2$	$G_{\text{св}}, \text{ кг/с}$	$P_{\text{пар}}, \text{ МПа}$	$P_{\text{воды}}, \text{ МПа}$
СП-1	2342,9	837,9	0,56	1
СП-2	2162,9		0,237	1
СП-3	3543,4		0,086	1
Номинальные характеристики				
Наименование, кол-во	$F, \text{ м}^2$	$G, \text{ кг/с}$	$P_{\text{пар}}, \text{ МПа}$	$P_{\text{воды}}, \text{ МПа}$
ПСГ-3000-3-11,4-1, 2 шт.	3000	973	0,6	1,12
ПСГ-2300-3-8- II, 2 шт.	2300	973	0,3	1,12
ПСГ-4900-2,2-11,4-11, 2 шт.	4900	862	0,22	1,12

$$Q_8 = G'_k \cdot (h_{\text{ок8}} - h'_{\text{к}}) = 441 \cdot (267 - 139) = 56,5 \text{ МВт};$$

$$\Delta t_{6.8} = t_{\text{с.8}} - t'_{\text{к}} = 63,5 - 33 = 30,5^\circ\text{C};$$

$$\Delta t_{\text{м.8}} = \theta_{\text{пнд}} = 2^\circ\text{C};$$

$$\Delta t_{\text{ср.8}} = \frac{\Delta t_{6.8} - \Delta t_{\text{м.8}}}{\ln(\Delta t_{6.8}/\Delta t_{\text{м.8}})} = \frac{30,5 - 2}{\ln(30,5/2)} = 10,5^\circ\text{C};$$

$$F_8 = \frac{Q_8}{k \cdot \Delta t_{\text{ср.8}}} = \frac{56,5 \cdot 10^3}{3 \cdot 10,5} = 1794 \text{ м}^2.$$

$$Q_7 = G_{\text{ок1}} \cdot (h_{\text{ок7}} - h_{\text{ок8}}) = 659,5 \cdot (395 - 267) = 85 \text{ МВт};$$

$$\Delta t_{6.7} = t_{\text{с.7}} - t_{\text{ок8}} = 96 - 65,5 = 30,5^\circ\text{C};$$

$$\Delta t_{\text{м.7}} = \theta_{\text{пнд}} = 2^\circ\text{C};$$

$$\Delta t_{\text{ср.7}} = \frac{\Delta t_{6.7} - \Delta t_{\text{м.7}}}{\ln(\Delta t_{6.7}/\Delta t_{\text{м.7}})} = \frac{30,5 - 2}{\ln(30,5/2)} = 10,5^\circ\text{C};$$

$$F_7 = \frac{Q_7}{k \cdot \Delta t_{\text{ср.7}}} = \frac{85 \cdot 10^3}{3 \cdot 10,5} = 2698 \text{ м}^2.$$

$$Q_6 = G_{\text{ок1}} \cdot (h_{\text{ок6}} - h_{\text{ок7}}) = 659,5 \cdot (524 - 395) = 85 \text{ МВт};$$

$$\Delta t_{6.6} = t_{\text{с.6}} - t_{\text{ок7}} = 126,5 - 94 = 32,5^\circ\text{C};$$

$$\Delta t_{\text{м.6}} = \theta_{\text{пнд}} = 2^\circ\text{C};$$

$$\Delta t_{cp.6} = \frac{\Delta t_{\delta.6} - \Delta t_{m.6}}{\ln(\Delta t_{\delta.6}/\Delta t_{m.6})} = \frac{32,5 - 2}{\ln(32,5/2)} = 11^{\circ}\text{C};$$

$$F_6 = \frac{Q_6}{k \cdot \Delta t_{cp.6}} = \frac{85 \cdot 10^3}{3 \cdot 11} = 2576 \text{ м}^2.$$

$$Q_5 = G_{ок} \cdot (h_{ок5} - h_{ок6}) = 761,8 \cdot (654 - 524) = 99 \text{ МВт};$$

$$\Delta t_{\delta.5} = t_{s.5} - t_{ок6} = 157 - 124,5 = 32,5^{\circ}\text{C};$$

$$\Delta t_{m.5} = \theta_{пнд} = 2^{\circ}\text{C};$$

$$\Delta t_{cp.5} = \frac{\Delta t_{\delta.6} - \Delta t_{m.6}}{\ln(\Delta t_{\delta.6}/\Delta t_{m.6})} = \frac{32,5 - 2}{\ln(32,5/2)} = 11^{\circ}\text{C};$$

$$F_5 = \frac{Q_5}{k \cdot \Delta t_{cp.5}} = \frac{99 \cdot 10^3}{3 \cdot 11} = 3000 \text{ м}^2.$$

$$Q_3 = G_{пв} \cdot (h_{пв3} - h_{пв}) = 1044 \cdot (834 - 712) = 127,4 \text{ МВт};$$

$$\Delta t_{\delta.3} = t_{s.3} - t_{пв} = 197 - 170 = 27^{\circ}\text{C};$$

$$\Delta t_{m.3} = \theta_{пвд} = 4^{\circ}\text{C};$$

$$\Delta t_{cp.3} = \frac{\Delta t_{\delta.3} - \Delta t_{m.3}}{\ln(\Delta t_{\delta.3}/\Delta t_{m.3})} = \frac{27 - 4}{\ln(27/4)} = 12^{\circ}\text{C};$$

$$F_3 = \frac{Q_3}{k \cdot \Delta t_{cp.3}} = \frac{127,4 \cdot 10^3}{3 \cdot 12} = 3539 \text{ м}^2.$$

$$Q_2 = G_{пв} \cdot (h_{пв2} - h_{пв3}) = 1044 \cdot (946 - 834) = 117 \text{ МВт};$$

$$\Delta t_{\delta.2} = t_{s.2} - t_{пв3} = 222 - 193 = 29^{\circ}\text{C};$$

$$\Delta t_{m.2} = \theta_{пвд} = 4^{\circ}\text{C};$$

$$\Delta t_{cp.2} = \frac{\Delta t_{\delta.2} - \Delta t_{m.2}}{\ln(\Delta t_{\delta.2}/\Delta t_{m.2})} = \frac{29 - 4}{\ln(29/4)} = 12,6^{\circ}\text{C};$$

$$F_2 = \frac{Q_2}{k \cdot \Delta t_{cp.2}} = \frac{117 \cdot 10^3}{3 \cdot 12,6} = 3096 \text{ м}^2.$$

$$Q_1 = G_{пв} \cdot (h_{пв1} - h_{пв2}) = 1044 \cdot (1062 - 946) = 122 \text{ МВт};$$

$$\Delta t_{\delta.1} = t_{s.1} - t_{пв2} = 247 - 218 = 29^{\circ}\text{C};$$

$$\Delta t_{m.1} = \theta_{пвд} = 4^{\circ}\text{C};$$

$$\Delta t_{cp.1} = \frac{\Delta t_{\delta.1} - \Delta t_{m.1}}{\ln(\Delta t_{\delta.1}/\Delta t_{m.1})} = \frac{29 - 4}{\ln(29/4)} = 12,6^{\circ}\text{C};$$

					ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		36

$$F_1 = \frac{Q_1}{k \cdot \Delta t_{cp,1}} = \frac{122 \cdot 10^3}{3 \cdot 12,6} = 3204 \text{ м}^2.$$

Таблица 1.2.3 – Результат выбора регенеративных теплообменников [15]

Расчетные характеристики				
Позиция	$F, \text{ м}^2$	$G, \text{ кг/с}$	$P_{\text{пар}}, \text{ МПа}$	$P_{\text{воды}}, \text{ МПа}$
ПНД 8	1794	441	0,0256	1,04
ПНД 7	2698	659,5	0,0878	1,14
ПНД 6	2576	659,5	0,243	1,14
ПНД 5	3000	761,8	0,572	1,14
ПВД 3	3539	1044	1,46	9,8
ПВД 2	3096	1044	2,41	9,8
ПВД 1	3204	1044	3,78	9,8
Номинальные характеристики				
Наименование, кол-во	$F, \text{ м}^2$	$P_{\text{пар}}, \text{ МПа}$	$P_{\text{воды}}, \text{ МПа}$	$G, \text{ кг/с}$
ПН-1900-42-4-IA, 1 шт.	1900	4,2	0,4	734
ПН-3000-25-16-ША, 1 шт.	3000	2,5	1,6	1112,5
ПН-3000-25-16-ША, 1 шт.	3000	2,5	1,6	1112,5
ПН-3000-25-16-ША, 1 шт.	3000	2,5	1,6	1112,5
ПВ-2500-97-28А, 2 шт.	2500	9,7	2,8	907,2
ПВ-2500-97-28А, 2 шт.	2500	9,7	2,8	907,2
ПВ-2500-97-28А, 2 шт.	2500	9,7	2,8	907,2

Деаэрационная колонка выбирается по максимальному давлению воды и рабочему давлению пара.

$$p_d = 0,76 \text{ МПа.}$$

На каждый блок устанавливается по возможности один деаэрактор с одной или двумя колонками. Суммарная производительность деаэракторов выбирается по максимальному расходу питательной воды. Емкость баков должна быть на 15% больше запаса питательной воды для обеспечения работы блока на полной мощности не менее 3,5 минут. Объем бака определяем по формуле:

$$V_B = \frac{G_{ПВ} \cdot t \cdot k_{зап}}{\rho_{ПВ}} = \frac{1044 \cdot 3,5 \cdot 60 \cdot 1,15}{908,2} = 278 \text{ м}^3.$$

Объемная производительность:

$$Q_d = G_{ПВ} \cdot \frac{3600}{1000} = 1044 \cdot \frac{3600}{1000} = 3758,4 \frac{\text{т}}{\text{ч}}.$$

Обратимся к каталогу деаэраторов для АЭС [16], выбрав агрегат. Наименование: ДП-6000/250-А-1. Наименование колонки: КПД-6000-А горизонтальная.

1.2.2 Выбор насосов

Сетевой насос. Рассчитаем объемную подачу насоса:

$$Q_{сн} = \frac{G_{св} \cdot 1,05 \cdot 3600}{\rho_{св}} = \frac{837,9 \cdot 1,05 \cdot 3600}{986} = 3212,2 \frac{\text{м}^3}{\text{ч}},$$

где $\rho_{св} = f(p_{св}; h_{ос}) = 986 \text{ кг/м}^3$ – плотность сетевой воды, которая перекачивается сетевым насосом.

Напор, развиваемый сетевым насосом:

$$H_{сн} = \frac{p_{св}}{\rho_{св} \cdot g} = \frac{1 \cdot 10^6}{986 \cdot 9,8} = 104 \text{ м}.$$

Обратимся к каталогу [17], выбрав агрегат. Зарезервируем выбранный насос.

Таблица 1.2.3 – Характеристики выбранного сетевого насоса

Марка насоса	Кол-во	Подача	Напор	Частота вращения	КПД	Мощность
	шт.	м ³ /ч	м	об/мин	%	кВт
СЭ 5000-160-50	2	5000	160	3000	86	3150

Питательный насос. Расход питательной воды:

$$G_{ПВ} = \alpha_{ПВ} \cdot G_0 = 1,035 \cdot 1009 = 1044 \text{ кг/с}.$$

Подача питательной воды:

$$Q_{ПВ} = \frac{3600 \cdot G_{ПВ}}{\rho_{ПВ}} = \frac{3600 \cdot 1044}{906} \cdot 1,05 = 4355,8 \frac{\text{м}^3}{\text{ч}},$$

где $\rho_{ПВ} = f(p_{ПВ}; h'_d) = 906 \text{ кг/м}^3$ – плотность питательной воды.

Давление на входе в питательный насос:

$$p_{\text{ПН}}^{\text{ВХ}} = p_{\text{д}} + \rho_{\text{ПВ}} \cdot g \cdot H_{\text{д}} = 0,76 \cdot 10^6 + 906 \cdot 9,8 \cdot 12 = 0,867 \text{ МПа},$$

где $H_{\text{д}} = 12 \text{ м}$ – высота от оси насоса до уровня воды в деаэраторе, обеспечивающая безкавитационную работу насоса. Давление на выходе из питательного насоса:

$$p_{\text{ПН}}^{\text{ВЫХ}} = p_0 + 2 \cdot \Delta p_{\text{ПВД}} + \rho_{\text{ПВ}} \cdot g \cdot H_{\text{ПГ}} = 7 + 3 \cdot 0,2 + 906 \cdot 9,8 \cdot \frac{12}{10^6} = 7,7 \text{ МПа},$$

где $\Delta p_{\text{ПВД}} = 0,2 \text{ м}$ – потери давления на прохождение тракта;

$H_{\text{ПГ}} = 12 \text{ м}$ – расстояние от оси насоса до уровня воды в ПГ.

Напор питательного насоса:

$$H_{\text{ПВ}} = \frac{p_{\text{ПН}}^{\text{ВЫХ}} - p_{\text{ПН}}^{\text{ВХ}}}{\rho_{\text{ПВ}} \cdot g} = \frac{(7,7 - 0,867) \cdot 10^6}{906 \cdot 9,8} = 769,6 \text{ м}.$$

Обратимся к каталогу [17], выбрав агрегат.

Таблица 1.2.4 – Характеристики выбранного питательного насоса

Марка насоса	Кол-во	Подача	Напор	Частота вращения	КПД	Мощность
	шт.	м ³ /ч	м	об/мин	%	кВт
ПТА-3750-75	3	3750	810	3500	82	9130

Включим два насоса параллельно, чтобы обеспечить необходимую подачу, и поставим один резервный, итого 3 шт. Дренажные насосы. Данные насосы установлены на Пб и П8 (см. Приложение Б). Массовая подача:

$$G_{\text{др8}} = \alpha_{\text{др8}} \cdot G_0 = 0,0654 \cdot 1009 = 66 \frac{\text{кг}}{\text{с}};$$

$$G_{\text{др6}} = \alpha_{\text{др6}} \cdot G_0 = 0,1003 \cdot 1009 = 102 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Объемная подача:

$$Q_{\text{др8}} = \frac{G_{\text{др8}} \cdot 3600}{\rho_{\text{др8}}} = \frac{66 \cdot 3600}{924} = 258 \frac{\text{м}^3}{\text{ч}};$$

$$Q_{\text{др6}} = \frac{G_{\text{др6}} \cdot 3600}{\rho_{\text{др6}}} = \frac{102 \cdot 3600}{937} = 392 \frac{\text{м}^3}{\text{ч}},$$

где $\rho_{др8} = f(p_{с8}; h_{др8}) = 924 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ и $\rho_{др6} = f(p_{с6}; h_{др6}) = 937 \text{ кг/м}^3$ – плотность конденсата, перекачиваемого дренажным насосом.

Напор, развиваемый насосом:

$$H_{др8} = \frac{p_{ок}}{\rho_{др8} \cdot g} = \frac{1,14 \cdot 10^6}{924 \cdot 9,8} = 126 \text{ м}; \quad H_{др6} = \frac{p_{ок}}{\rho_{др6} \cdot g} = \frac{1,14 \cdot 10^6}{937 \cdot 9,8} = 124 \text{ м}.$$

Обратимся к каталогу [17], выбрав агрегаты.

Таблица 1.2.5 – Характеристики выбранных дренажных насосов

Марка насоса	Подогреватель	Кол.	Подача	Напор	Частота вращения	Мощность
		шт.	м ³ /ч	м	об/мин	кВт
КсВ 320-160-2	ПНД-6	3	320	160	1480	250
КсВ 320-160-2	ПНД-8	3	320	160	1480	250

Примем два насоса на подачу по 50% каждый, плюс один резервный.

Конденсатные насосы. Определим общую массовую подачу конденсатных насосов первой ступени:

$$G_{кн1} = G_{к} + G_{э} + G_{дв} + G_{упл} = 423 + 3 + 5 + 10,1 = 442 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Объемная подача составит:

$$Q_{кн1} = \frac{G_{кн1}}{\rho_{кн1}} = \frac{442}{995} \cdot 3600 = 1600 \frac{\text{м}^3}{\text{ч}},$$

где $\rho_{кн1} = 995 \text{ кг/м}^3$ – плотность конденсата, перекачиваемого конденсатными насосами первой ступени.

$$p_{кн1} = p_{подп} + \Delta p_{то} + \Delta p_{БОУ} + \Delta p_{кл} + \Delta p_{тр} = 0,2 + 0,02 + 0,5 + 0,1 + 0,1 = 0,92 \text{ МПа};$$

Напор, развиваемый насосами первой ступени (до БОУ):

$$H_{кн1} = \frac{p_{кн1}}{\rho_{кн1} \cdot g} = \frac{0,92 \cdot 10^6}{995 \cdot 9,8} = 94 \text{ м}.$$

Обратимся к каталогу [17], выбрав агрегат.

Таблица 1.2.6 – Характеристики конденсатных насосов первой ступени

Марка насоса	Кол.	Подача	Напор	Частота вращения	КПД	Мощность
	шт.	м ³ /ч	м	об/мин	%	кВт
КсВ 1500-120	2	1850	95	740	80	585

Примем один рабочий насос и один резервный.

Общая массовая подача конденсатных насосов второй ступени:

$$G_{кн2} = G_{кн1} = 442 \text{ кг/с.}$$

Объемная подача составит:

$$Q_{кн2} = \frac{G_{кн2}}{\rho_{кн2}} = \frac{442}{993} \cdot 3600 = 1602 \frac{\text{м}^3}{\text{ч}},$$

где $\rho_{кн2} = 993 \text{ кг/м}^3$ – плотность конденсата, перекачиваемого конденсатными насосами второй ступени.

Напор, развиваемый насосами второй ступени:

$$H_{кн2} = \frac{p_{кн2}}{\rho_{кн2} \cdot g} = \frac{1,5 \cdot 10^6}{993 \cdot 9,8} = 155 \text{ м.}$$

Обратимся к каталогу [17], выбрав агрегат.

Таблица 1.2.7 – Характеристики конденсатных насосов второй ступени

Марка насоса	Кол.	Подача	Напор	Частота вращения	КПД	Мощность
	шт.	м ³ /ч	м	об/мин	%	кВт
КсВ1500-240	2	1850	170	2975	84	998

Примем один рабочий насос и один резервный.

1.2.3 Выбор конденсаторов

Число конденсаторов равно числу цилиндров низкого давления, поэтому на проектируемом блоке будет установлено два конденсатора (см. п. 1.1.4). Известно, что расход пара в турбинах АЭС гораздо больше расхода пара в турбинах ТЭС, при тех же мощностях. Кратность циркуляции составляет порядка 50 единиц. Это означает, что для конденсации условной единицы массы пара требуется в 50 раз больше по массе охлаждающей воды.

Обратившись к источнику [18, с. 215], выберем серийный конденсатор прототипной турбины: К-163160 (К-1000/5,9/25-1, ХТЗ).

					<i>ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		42

1.3 Расчет парогенератора

Для того, чтобы начать расчет парогенератора, не хватает некоторых исходных данных, которые следует предварительно определить. В предыдущем подразделе вычислили температуру питательной воды (245°C), её расход и расход продувки (1044 кг/с и $20,2 \text{ кг/с}$). Давление и температуру свежего пара диктуют исходные данные (7 МПа и $310,8^{\circ}\text{C}$). Остается вычислить параметры воды первого контура.

Давление теплоносителя в реакторе принимается максимально возможным по условиям изготовления его корпуса. При современном состоянии мирового и отечественного реакторостроения таким давлением является 16 МПа . Температура насыщения для этого давления равна $347,4^{\circ}\text{C}$. Температура теплоносителя на выходе из реактора ограничивается условием – однофазность теплоносителя на выходе из реактора. Запас до температуры насыщения рекомендуется принять 25°C . Тогда максимальная температура на выходе из реактора составляет $322,4^{\circ}\text{C}$. Примем в расчете температуру теплоносителя на выходе из реактора 322°C . Рекомендуемый нагрев теплоносителя в реакторе около 30°C . Принимаем нагрев 29°C . Тогда температура теплоносителя на входе в реактор составит 293°C .

Принимаем, что число петель равно 4. Полученные данные о расходах питательной воды и продувочной воды парогенератора делим поровну между четырьмя парогенераторами (петлями).

Теперь для расчета парогенератора имеются все необходимые исходные данные. Представим их в таблице 1.3.1.

					<i>ФЮРА.XXXXXXX.001 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		43

Таблица 1.3.1 – Исходные данные для проекта парогенератора

Параметр	Обозначение	Значение
Расход питательной воды	D_2	261 кг/с
Давление в 1 контуре	p_1	16 МПа
Температура ТН на входе в ПГ	t'_1	322°C
Температура ТН на выходе из ПГ	t''_1	293°C
Давление пара	p_2	7 МПа
Температура пара	t''_2	310,8°C
Температура питательной воды	$t_{пв}$	245°C
Величина продувки парогенератора	$D_{пр}$	5 кг/с
Теплотехническая схема	ТТС	Э+И+ПЕ

1.3.1 Выбор конструктивной и теплотехнической схемы

Теплотехнической (тепловой) схемой парогенератора называют схему, отражающую в графическом виде процесс передачи тепла от греющего теплоносителя к рабочему телу. Теплообменную поверхность ПГ при этом условно разбивают на участки (зоны, элементы), выполняющие специфичные функции. Из исходных данных следует, что в данном проекте ПГ состоит из трех элементов:

- Экономайзер;
- Испаритель;
- Перегреватель.

Парогенераторы ВВЭР обогреваются водой под давлением, предназначаются для выработки сухого насыщенного или слабо перегретого пара, что не позволяет достигнуть максимального значения средней температуры подвода тепла к циклу и получить высокий КПД.

В данном проекте пар перегрет на 25 градусов. Недогрев питательной воды до температуры насыщения составляет 40,8 градуса. Это всё говорит о том, что теплотехническая схема будет выглядеть следующим образом:

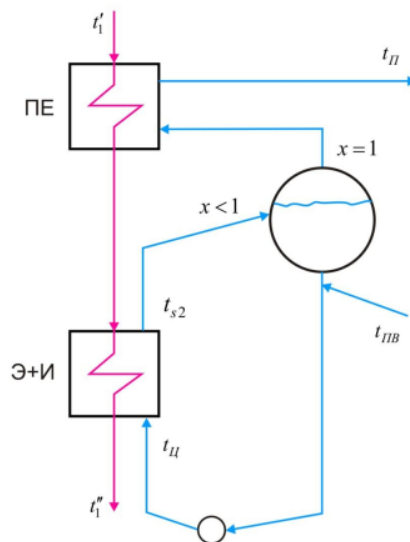


Рисунок 1.3.1 – Теплотехническая схема парогенераторной установки с естественной циркуляцией и с пароперегревателем и совмещенным экономайзером и испарителем

При расчете принимаем, что температурных потерь в главном циркуляционном трубопроводе нет. Температура теплоносителя на выходе из реактора равна температуре на входе в парогенератор. Температура теплоносителя на выходе из парогенератора равна температуре теплоносителя на входе в активную зону реактора.

1.3.2 Расчет и построение тепловой диаграммы

Расчет основан на решении уравнения теплового баланса теплоносителя первого контура и рабочего тела второго контура. Сделаем допущение, что давление теплоносителя и рабочего тела внутри парогенератора не меняется.

Найдём необходимые энтальпии. Вычисление производилось с помощью встроенных термодинамических таблиц Excel.

$$h_{ПВ} = f(t_{ПВ}, p_2) = 1062 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}};$$

$$h'_s = f(x = 0, p_2) = 1267 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}};$$

$$h'_s = f(x = 1, p_2) = 2773 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}};$$

$$h''_2 = f(t''_2, p_2) = 2884 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Зная энтальпии и расход рабочего тела во втором контуре, рассчитаем, сколько тепла приобретает рабочее тело на каждом участке в единицу времени:

$$Q_{\text{ЭК}} = D_2 \cdot (h'_s - h_{\text{ПВ}}) = 261 \cdot (1267 - 1062) = 53505 \text{ кВт};$$

$$Q_{\text{И}} = (D_2 - D_{\text{ПР}}) \cdot (h'_s - h'_s) = 261 \cdot (2773 - 1267) = 385536 \text{ кВт};$$

$$Q_{\text{ПЕ}} = (D_2 - D_{\text{ПР}}) \cdot (h''_2 - h'_s) = 261 \cdot (2884 - 2773) = 28416 \text{ кВт}.$$

Тепловая мощность парогенератора складывается из тепловых мощностей всех участков, она равна:

$$Q_{\text{ПГ}} = Q_{\text{ЭК}} + Q_{\text{И}} + Q_{\text{ПЕ}} = 467457 \text{ кВт}.$$

Вспомним, что полученное значение мощности парогенератора при расчете тепловой схемы составило:

$$Q'_{\text{ПГ}} = \frac{Q_{\text{ПГ}}^{\text{сх}}}{n_{\text{петель}}} = \frac{2222,3}{4} = 467500 \text{ кВт}.$$

Разница, составляющая 43 кВт, обусловлена особенностями округления. Единственной потерей тепла как в ПГ в целом, так и в его отдельных элементах является теплоотдача от корпусов в окружающую среду, обычно $\eta = 0,99 \div 0,97$. [10] В данном расчете принято значение $\eta = 0,97$.

Найдем расход теплоносителя через парогенератор, используя уравнение теплового баланса:

$$G_{\text{ТН}} = \frac{Q_{\text{ПГ}}}{(h'_1 - h''_1) \cdot \eta} = \frac{467457}{(1464 - 1300) \cdot 0,97} = 2939 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

					ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		46

Теперь рассчитаем температуру теплоносителя по участкам парогенератора, предварительно вычислив энтальпии через уравнения балансов:

$$h''_{1и} = \frac{Q_{ЭК}}{G_{ТН} \cdot \eta} + h'_1 = \frac{53505}{2939 \cdot 0,97} + 1300 = 1319 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}};$$

$$t''_{1и} = f(p_1; h''_{1и}) = 296,6^\circ\text{C};$$

$$h'_{1и} = \frac{Q_{исп}}{G_{ТН} \cdot \eta} + h''_{1и} = \frac{385536}{2939 \cdot 0,97} + 1319 = 1454,2 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}};$$

$$t'_{1и} = f(p_1; h'_{1и}) = 320,4^\circ\text{C}.$$

Зная характерные температуры, построим тепловую диаграмму.

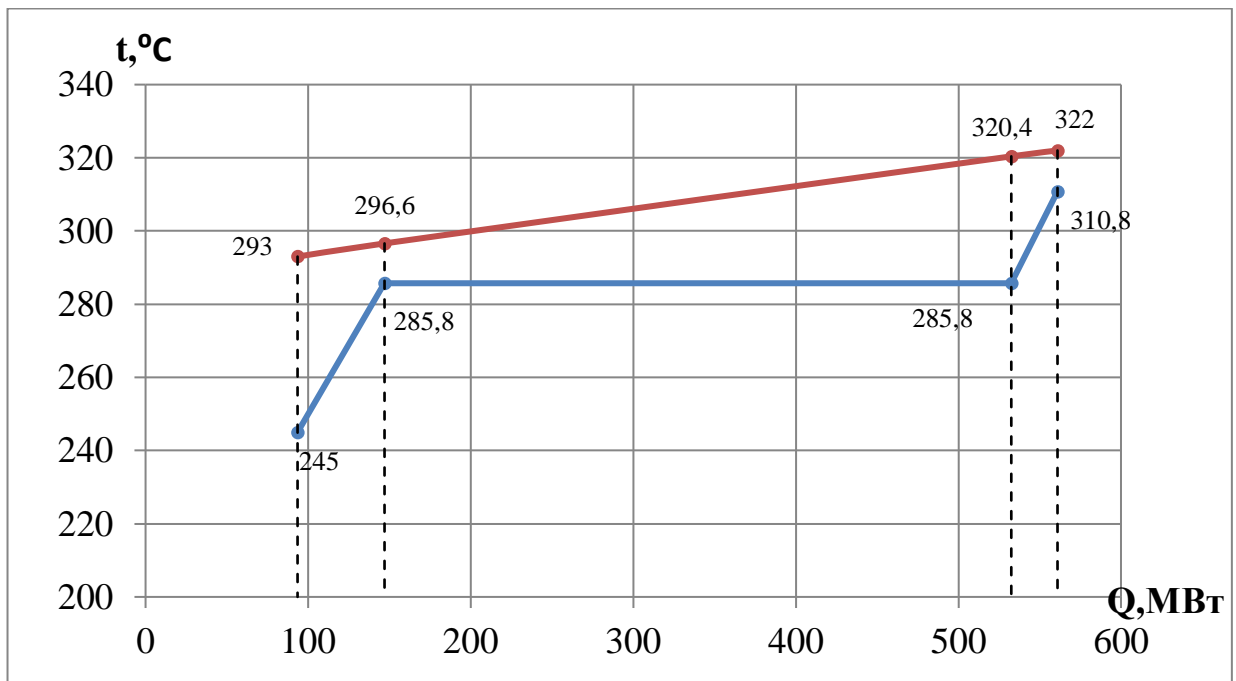


Рисунок 1.3.2 – t, Q-диаграмма проектируемого ПГ

По диаграмме видно, что основную часть тепла рабочее тело получает на участке испарителя (82%). Вообще, участки экономайзера и испарителя разделены чисто условно, так как в парогенераторе данного типа они совмещены (в корпусе происходит нагрев от трубок до температуры насыщения и дальнейший нагрев до испарения). Перегревательный участок трубок размещен отдельно, расположен в паровом пространстве.

1.3.3 Тепловой расчет поверхности нагрева

1.3.3.1 Определение количества трубок

Принимаем толщину и диаметр теплообменных труб в соответствии с последними конструкторскими решениями в отношении прототипных парогенераторов.

$$d_{\text{нар}} = 16 \text{ мм}, \delta_{\text{тр}} = 1,5 \text{ мм}, d_{\text{внут}} = 16 - 2 \cdot 1,5 = 13 \text{ мм}.$$

Площадь живого сечения трубки:

$$f_{\text{тр}} = \frac{\pi \cdot d_{\text{вн}}^2}{4} = \frac{\pi \cdot 13^2}{4} = 132,7 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

Согласно рекомендациям [10] диапазон изменения скорости ТН в трубках теплопередающей поверхности $3 \div 5$ м/с. Принимаем скорость теплоносителя на входе в трубки $w_{1\text{вх}} = 4,85$ м/с.

Плотность теплоносителя на входе в перегревательный участок:

$$\rho_{1\text{вх}} = f(t'_1, p_1) = 676,3 \text{ кг/м}^3.$$

Из уравнения неразрывности определим число труб теплопередающей поверхности:

$$n_{\text{тр}} = \frac{G_{\text{ТН}}}{\rho_{1\text{вх}} \cdot w_{1\text{вх}} \cdot f_{\text{тр}}} = \frac{2939}{676,3 \cdot 4,85 \cdot 132,7 \cdot 10^{-6}} = 6755 \text{ шт}.$$

1.3.3.2 Экономайзерный участок

Площадь теплопередающей поверхности определяется следующим выражением:

$$S = \frac{Q}{k \cdot \Delta t_{\text{ср}}}.$$

Коэффициент теплопередачи k слабо меняется на этом участке от входа до выхода. Для подстраховки, будем считать по отношению ко входу, так как там будет этот коэффициент несколько выше, таким образом сделаем запас по площади.

					ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		48

Отношение внешнего диаметра трубки к внутреннему диаметру гораздо меньше двух единиц, поэтому, по рекомендациям [5] можно использовать формулу расчета для плоской стенки:

$$k = \left[\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}} + 2 \cdot R_{ок} + \frac{1}{\alpha_2} \right]^{-1}.$$

Коэффициент теплоотдачи от теплоносителя к стенке определим по формуле Михеева:

$$\alpha_1 = 0,021 \cdot \frac{\lambda}{d_{вн}} \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43}.$$

Число Рейнольдса теплоносителя на входе в экономайзерный участок:

$$Re_{1ВХ}^{ЭК} = \frac{w_{1ВХ}^{ЭК} \cdot d_{вн} \cdot \rho_{1ВХ}^{ЭК}}{\mu_{1ВХ}^{ЭК}}.$$

$$\rho_{1ВХ}^{ЭК} = f(t''_{1и}; p_1) = 734 \frac{\text{КГ}}{\text{М}^3}; \mu_{1ВХ}^{ЭК} = f(t''_{1и}; p_1) = 9 \cdot 10^{-5} \text{Па} \cdot \text{с};$$

$$w_{1ВХ}^{ЭК} = \frac{G_{ТН}}{\rho_{1ВХ}^{ЭК} \cdot n_{Тр} \cdot f_{Тр}} = \frac{2939}{734 \cdot 6755 \cdot 132,7 \cdot 10^{-6}} = 4,47 \text{ м/с};$$

$$Re_{1ВХ}^{ЭК} = \frac{4,47 \cdot 13 \cdot 10^{-3} \cdot 743}{9 \cdot 10^{-5}} = 4,73 \cdot 10^5.$$

Другие параметры теплоносителя в рассматриваемом сечении:

$$\lambda_{1ВХ}^{ЭК} = f(t''_{1и}; p_1) = 0,567 \frac{\text{Вт}}{\text{М} \cdot \text{К}}; Pr_{1ВХ}^{ЭК} = f(t''_{1и}; p_1) = 0,852;$$

Найдем искомую величину:

$$\alpha_{1ВХ}^{ЭК} = 0,021 \cdot \frac{0,567}{13 \cdot 10^{-3}} \cdot (4,73 \cdot 10^5)^{0,8} \cdot (0,852)^{0,43} = 29657 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}.$$

Далее следует определить коэффициент теплоотдачи от стенки к рабочему телу. Определять будем с помощью коэффициента Нуссельта, который рассчитывается для продольно обтекаемого пучка труб однофазным водяным потоком следующим образом:

$$Nu = A \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4}.$$

Вертикальный шаг коридорного пучка парогенератора ПГВ-1000МКП составляет 22 мм, горизонтальный 24 мм. Относительный шаг (средний):

					ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		49

$$x = \sqrt{x_1 \cdot x_2} = \sqrt{\frac{s_1}{d_{\text{нар}}} \cdot \frac{s_2}{d_{\text{нар}}}} = \frac{\sqrt{22 \cdot 24}}{16} = 1,436.$$

Гидравлический диаметр для пучков труб с коридорным расположением:

$$d_{\Gamma} = d_{\text{нар}} \cdot \left(\frac{4 \cdot x^2}{\pi} - 1 \right) = 16 \cdot \left(\frac{4 \cdot 1,436^2}{\pi} - 1 \right) = 26 \text{ мм.}$$

Параметры рабочего тела на входе в экономайзерный участок:

$$\rho_{2\text{ВХ}}^{\text{ЭК}} = f(t_{\text{ПВ}}; p_2) = 810 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}; \mu_{2\text{ВХ}}^{\text{ЭК}} = f(t_{\text{ПВ}}; p_2) = 10,9 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с};$$

$$\lambda_{2\text{ВХ}}^{\text{ЭК}} = f(t_{\text{ПВ}}; p_2) = 0,628 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}; Pr_{2\text{ВХ}}^{\text{ЭК}} = f(t_{\text{ПВ}}; p_2) = 0,832;$$

$$w_{2\text{ВХ}}^{\text{ЭК}} = 3,5 \frac{\text{м}}{\text{с}} \text{ (принимаем);}$$

$$Re_{2\text{ВХ}}^{\text{ЭК}} = \frac{w_{2\text{ВХ}}^{\text{ЭК}} \cdot d_{\Gamma} \cdot \rho_{2\text{ВХ}}^{\text{ЭК}}}{\mu_{2\text{ВХ}}^{\text{ЭК}}} = \frac{3,5 \cdot 0,026 \cdot 810}{10,9 \cdot 10^{-5}} = 6,77 \cdot 10^5.$$

Безразмерный коэффициент вычисляется следующим образом:

$$A = 0,0165 + 0,02 \cdot (1 - 0,91 \cdot x^{-2}) \cdot x^{0,15} = 0,0283.$$

Безразмерный коэффициент теплоотдачи:

$$Nu = 0,0283 \cdot (6,74 \cdot 10^5)^{0,8} \cdot (0,832)^{0,4} = 1213,8.$$

Коэффициент теплоотдачи от стенки к рабочему телу:

$$\alpha_{2\text{ВХ}}^{\text{ЭК}} = \frac{Nu \cdot \lambda_{2\text{ВХ}}^{\text{ЭК}}}{d_{\Gamma}} = \frac{1213,8 \cdot 0,628}{0,026} = 29298 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К.}$$

Конвективные составляющие вычислены, осталось рассчитать теплопередачу теплопроводностью стенкой трубы и слоем окислов. Материалом теплообменных труб служит сталь марки 08Х18Н10Т (класс: коррозионно-стойкая жаропрочная, аустенитная). Обратившись к источнику [12], позаимствуем значения теплопроводности:

$$\lambda_{\text{ст}}(200^{\circ}\text{C}) = 18 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}};$$

$$\lambda_{\text{ст}}(300^{\circ}\text{C}) = 19 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}.$$

Для первой итерации величина q' может быть принята равной:

$$q' = (0,7 \div 0,8) \cdot \Delta t \cdot \left[\frac{1}{\alpha_{1ВХ}^И} + \frac{\delta_{СТ}}{\lambda_{СТ}} + 2 \cdot R_{ОК} \right]^{-1}.$$

Вспоминаем из пункта 1.3.3.2 значения теплопроводности:

$$\lambda_{СТ}(200^{\circ}\text{C}) = 18 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}};$$

$$\lambda_{СТ}(300^{\circ}\text{C}) = 19 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}.$$

Приближенно примем:

$$\lambda_{СТ} = 19 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}.$$

Температурный напор на входе в испарительный участок:

$$\Delta t_{ВХ}^И = t'_{1И} - t_{S2} = 320,4 - 285,8 = 34,6^{\circ}\text{C}.$$

Плотность теплового потока на входном участке испарителя для первой итерации без учета теплоотдачи от стенки к рабочему телу составляет:

$$q' = 0,8 \cdot 34,6 \cdot \left[\frac{1}{31102} + \frac{1,5 \cdot 10^{-3}}{19} + 2 \cdot 10^{-5} \right]^{-1} = 210893 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

Коэффициент теплоотдачи от стенки к рабочему телу на входном участке испарителя для первой итерации составляет:

$$\alpha_{2ВХ}^И ' = 4,32 \cdot (7^{0,14} + 1,28 \cdot 10^{-2} \cdot 7^2) \cdot 210893^{0,7} = 44690 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}.$$

Коэффициент теплопередачи от стенки к рабочему телу на входном участке испарителя для первой итерации составляет:

$$k_{2ВХ}^И ' = \left[\frac{1}{\alpha_{1ВХ}^И} + \frac{\delta_{СТ}}{\lambda_{СТ}} + 2 \cdot R_{ОК} + \frac{1}{\alpha_{2ВХ}^И} \right]^{-1} =$$
$$= \left[\frac{1}{31102} + \frac{1,5 \cdot 10^{-3}}{19} + 2 \cdot 10^{-5} + \frac{1}{44690} \right]^{-1} = 6516 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}.$$

Плотность теплового потока на входном участке испарителя для первой итерации с учетом теплоотдачи от стенки к рабочему телу составляет:

$$q'' = k_{2ВХ}^И ' \cdot \Delta t_{ВХ}^И = 6516 \cdot 34,6 = 225181 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

									Лист
									53
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата					

Отношение рассчитанных плотностей тепловых потоков выходит за рамки, разница составила больше допустимых пяти процентов:

$$\frac{q'}{q''} = \frac{210893}{225181} = 0,937 \leq 0,95.$$

Произведем вторую итерацию, приняв $q' = q'' = 225181 \text{ Вт/м}^2$:

$$\alpha_{2\text{ВХ}}^{\text{и}'} = 4,32 \cdot (7^{0,14} + 1,28 \cdot 10^{-2} \cdot 7^2) \cdot 225181^{0,7} = 46788 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К};$$

$$k_{2\text{ВХ}}^{\text{и}'} = \left[\frac{1}{31102} + \frac{1,5 \cdot 10^{-3}}{19} + 2 \cdot 10^{-5} + \frac{1}{46788} \right]^{-1} = 6559 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К};$$

$$q'' = k_{2\text{ВХ}}^{\text{и}'} \cdot \Delta t_{\text{ВХ}}^{\text{и}} = 6559 \cdot 34,6 = 226664 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2};$$

$$\frac{q'}{q''} = \frac{225181}{226664} = 0,993 \leq 1,05.$$

Итерационный расчет окончен. Коэффициент теплопередачи от стенки к рабочему телу на входном участке испарителя составляет:

$$k_{\text{и}} = 6559 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}.$$

Средний логарифмический температурный напор на испарительном участке составляет:

$$\Delta t_{\text{ср}}^{\text{и}} = \frac{\Delta t_{\text{б}} - \Delta t_{\text{м}}}{\ln\left(\frac{\Delta t_{\text{б}}}{\Delta t_{\text{м}}}\right)} = \frac{(320,4 - 285,8) - (296,6 - 285,8)}{\ln\left(\frac{320,4 - 285,8}{296,6 - 285,8}\right)} = 20^{\circ}\text{C}.$$

Наконец, можно вычислить площадь теплопередающей поверхности испарительного участка (с учетом запаса в 15%):

$$S_{\text{и}} = k \cdot \frac{Q_{\text{и}}}{\Delta t_{\text{ср}}^{\text{и}} \cdot k_{\text{и}}} = 1,15 \cdot \frac{385536}{20 \cdot 6559} = 3307 \text{ м}^2.$$

1.3.3.3 Пароперегревательный участок

Произведем аналогичный расчет.

$$\rho_{1\text{ВХ}}^{\text{пе}} = f(t'_1; p_1) = 676,3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}; \mu_{1\text{ВХ}}^{\text{пе}} = f(t'_1; p_1) = 8 \cdot 10^{-5} \text{Па} \cdot \text{с};$$

$$w_{1\text{ВХ}}^{\text{пе}} = \frac{G_{\text{ТН}}}{\rho_{1\text{ВХ}}^{\text{пе}} \cdot n_{\text{ТР}} \cdot f_{\text{ТР}}} = \frac{3480}{676,3 \cdot 8000 \cdot 132,7 \cdot 10^{-6}} = 4,85 \text{ м/с};$$

$$Re_{1\text{ВХ}}^{\text{пе}} = \frac{w_{1\text{ВХ}}^{\text{пе}} \cdot d_{\text{ВН}} \cdot \rho_{1\text{ВХ}}^{\text{пе}}}{\mu_{1\text{ВХ}}^{\text{пе}}} = \frac{4,85 \cdot 13 \cdot 10^{-3} \cdot 676,3}{8 \cdot 10^{-5}} = 5,33 \cdot 10^5;$$

$$\lambda_{1\text{ВХ}}^{\text{пе}} = f(t'_1; p_1) = 0,516 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}; Pr_{1\text{ВХ}}^{\text{пе}} = f(t'_1; p_1) = 0,961;$$

$$\alpha_{1\text{ВХ}}^{\text{пе}} = 0,021 \cdot \frac{0,516}{13 \cdot 10^{-3}} \cdot (5,33 \cdot 10^5)^{0,8} \cdot (0,961)^{0,43} = 31242 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}.$$

$$w_{2\text{ВЫХ}}^{\text{пе}} = 2 \frac{\text{м}}{\text{с}} \text{ (принимаем);}$$

$$\rho_{2\text{ВЫХ}}^{\text{пе}} = f(t''_2; p_2) = 32 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}; \mu_{2\text{ВЫХ}}^{\text{пе}} = f(t''_2; p_2) = 2 \cdot 10^{-5} \text{Па} \cdot \text{с};$$

$$\lambda_{2\text{ВЫХ}}^{\text{пе}} = f(t''_2; p_2) = 0,06 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}; Pr_{2\text{ВЫХ}}^{\text{пе}} = f(t''_2; p_2) = 1,3;$$

$$Re_{2\text{ВЫХ}}^{\text{пе}} = \frac{w_{2\text{ВЫХ}}^{\text{пе}} \cdot d_{\text{Г}} \cdot \rho_{2\text{ВЫХ}}^{\text{пе}}}{\mu_{2\text{ВЫХ}}^{\text{пе}}} = \frac{2 \cdot 0,026 \cdot 32}{2 \cdot 10^{-5}} = 83280;$$

$$\alpha_{2\text{ВЫХ}}^{\text{пе}} = 0,021 \cdot \frac{0,06}{26 \cdot 10^{-3}} \cdot (83280)^{0,8} \cdot (1,3)^{0,43} = 468 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К};$$

$$\lambda_{\text{СТ}} = 19,5 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}; k_{\text{пе}} = \left[\frac{1}{\alpha_{1\text{ВХ}}^{\text{пе}}} + \frac{\delta_{\text{СТ}}}{\lambda_{\text{СТ}}} + 2 \cdot R_{\text{ОК}} + \frac{1}{\alpha_{2\text{ВЫХ}}^{\text{пе}}} \right]^{-1};$$

$$k_{\text{пе}} = \left[\frac{1}{31242} + \frac{1,5 \cdot 10^{-3}}{19,5} + 2 \cdot 10^{-5} + \frac{1}{468} \right]^{-1} = 441 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}};$$

$$\Delta t_{\text{ср}}^{\text{пе}} = \frac{\Delta t_{\text{Г}} - \Delta t_{\text{М}}}{\ln \left(\frac{\Delta t_{\text{Г}}}{\Delta t_{\text{М}}} \right)} = \frac{(320,4 - 285,8) - (322 - 310,8)}{\ln \left(\frac{320,4 - 285,8}{322 - 310,8} \right)} = 21^{\circ}\text{C}.$$

$$S_{\text{пе}} = K \cdot \frac{Q_{\text{пе}}}{\Delta t_{\text{ср}}^{\text{пе}} \cdot k_{\text{пе}}} = 1,15 \cdot \frac{28416}{21 \cdot 441} = 3567 \text{ м}^2.$$

					ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		55

1.4 Расчет ядерного реактора

1.4.1 Обоснование конструкции реакторной установки

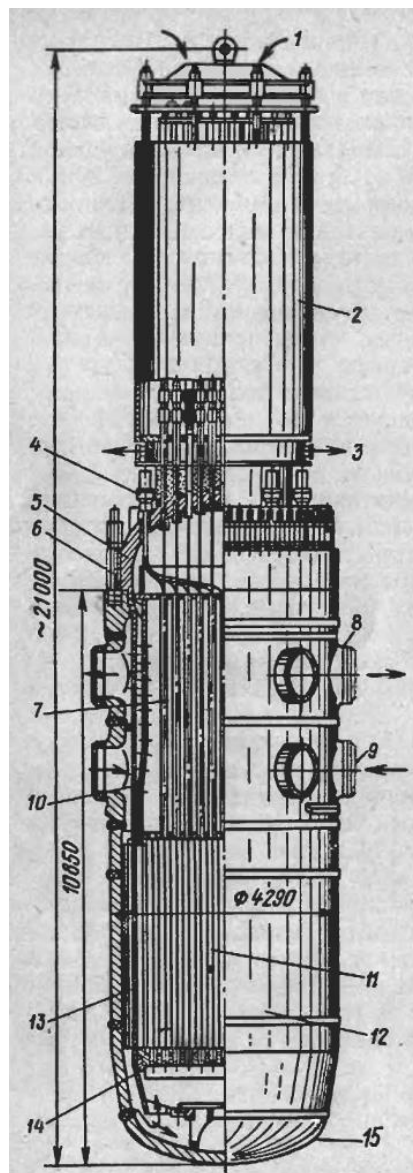


Рисунок 1.4.1 – Общий вид реактора ВВЭР-1000 [3, с.42]:

1, 3 – подвод и отвод охлаждающего воздуха; 2 – верхний блок с приводами СУЗ; 4 – штуцер для подвода коммуникаций внутриреакторных измерений; 5 – съемная крышка; 6 – шпильки крепления крышки с корпусом; 7 – верхний блок защитных труб с перфорированной обечайкой; 8, 9 – патрубки теплоносителя; 10 – подвесная шахта; 11 – активная зона; 12 – корпус реактора; 13 – тепловой экран; 14 – нижняя опорная решетка; 15 –

эллиптическое днище

									Лист
									56
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ				

При разработке будем ориентироваться на реакторную установку так называемой «большой серии», ВВЭР-1000/В-320. Реактор водо-водяной, гетерогенный, корпусного типа, работающий на тепловых нейтронах с водяным теплоносителем и водяным замедлителем (вода под давлением). За прототип тепловыделяющей сборки примем ТВС-2М.

В проекте выбраны материалы, используемые в прототипе. Топливные таблетки – диоксид урана, керамическое топливо. Оболочка твэл – сплав Э110 (Zr-1%Nb). Из этого же сплава сделаны дистанционирующие решетки, а также центральный и направляющие каналы. Головка и хвостовик ТВС выполнены из стали марки 08X18H10T. В качестве материала корпуса реактора используется легированная углеродистая сталь 15X2НМФА. Шахта внутрикорпусная и выгородка реактора выполняются из нержавеющей стали 08X18H10T. Материалы верхнего блока: крышка – сталь 15X2МФА; металлоконструкция – ВСт3; чехол, приводы, механическая часть – сталь 08X18H10T [1, с.59].

1.4.2 Определение основных геометрических характеристик

Первым шагом следует определить объем активной зоны проектируемого реактора. Это есть отношение тепловой тепловой мощности к удельному объемному энерговыделению. Тепловую мощность реактора определим с помощью значений, полученных в расчете парогенератора:

$$N_T = G_{\text{ТН}} \cdot (h'_1 - h''_1) \cdot n_{\text{петель}} = 2939 \cdot (1464 - 1300) \cdot 4 = 1928 \text{ МВт.}$$

Так как удельное энерговыделение не задано, его принимают равным из промежутка 80...110 МВт/м³. Средняя объемная энергонапряженность активной зоны реактора ВВЭР-1000 [3, с.47]:

$$W' = 110 \text{ кВт/л} = 110 \text{ МВт/м}^3.$$

Примем в расчетах значение:

$$W = 83,52 \text{ МВт/м}^3.$$

					ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		57

Объем активной зоны:

$$V = \frac{N_T}{W} = \frac{1928}{83.52} = 23,08 \text{ м}^3.$$

Высоту активной зоны примем по прототипу ТВС-2М [2, с.544]:

$$H_0 = 3730 \text{ мм.}$$

Тогда эквивалентный диаметр активной зоны цилиндрической формы примет значение:

$$D_0 = \sqrt{\frac{4 \cdot V}{\pi \cdot H_0}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 23,08}{\pi \cdot 3,73}} = 2,81 \text{ м.}$$

Следующим шагом следует вычислить площадь, занимаемую одной ячейкой. Размер «под ключ» и ширину водяного зазора между ТВС примем в соответствии с прототипной ТВС:

$$h_{\text{кл}} = 235 \text{ мм}; \quad \delta_{\text{вз}} = 2 \text{ мм.}$$

Площадь одной ячейки с учетом водяного зазора примет значение:

$$f_{\text{яч}} = 6 \cdot \sqrt{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{h_{\text{кл}} + \delta_{\text{вз}}}{2}\right)^2 = 2 \cdot \sqrt{3} \cdot \left(\frac{235 + 2}{2}\right)^2 = 0,048644 \text{ м}^2.$$

Число ячеек в активной зоне (у прототипа ВВЭР-1000 163 ТВС):

$$n_{\text{яч}} = \frac{\pi \cdot D_0^2}{4 \cdot f_{\text{яч}}} = \frac{\pi \cdot 2,81^2}{4 \cdot 0,048644} = 127.$$

Строим в масштабе эскиз активной зоны. По эскизу можно наблюдать симметричное расположение ячеек. Такая симметрия получилась благодаря правильному подбору величины энергонапряженности, которая является варьируемой.

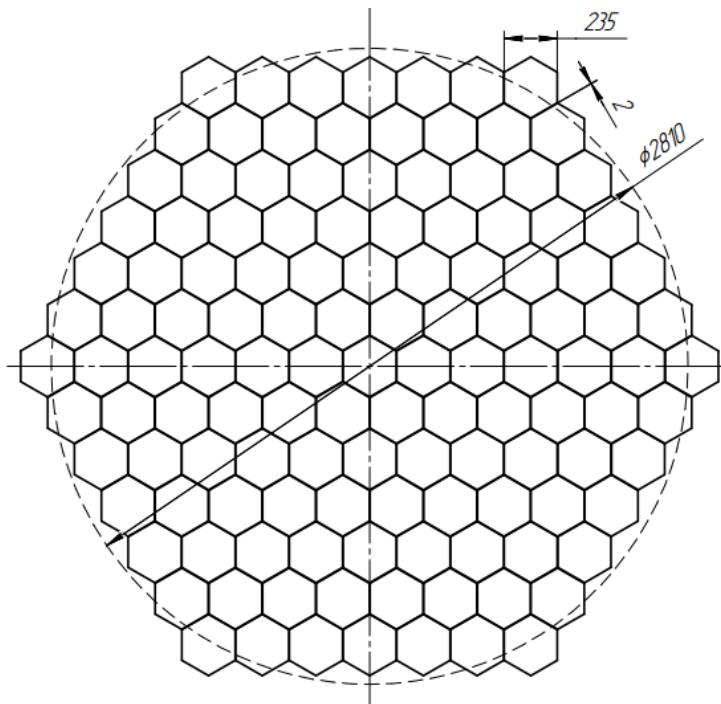


Рисунок 1.4.2 – Эскиз активной зоны реактора

По прототипу принимаем следующие технические характеристики для ТВС [1, с.55].

Таблица 1.4.1 – Технические характеристики ТВС

Характеристика	Значение
Число ТВЭЛОВ, $n_{ТВЭЛ}$	312
Число направляющих каналов для пэлов, $n_{НК}$	18
Число центральных каркасных трубок, $n_{ЦТ}$	1
Наружный диаметр ТВЭЛА $d_{нар}$, мм	9,1
Наружный диаметр направляющих каналов $d_{НК}$, мм	12,6
Наружный диаметр центральной трубки $d_{ЦТ}$, мм	13,0

Проходное сечение для теплоносителя в одной ячейке:

$$\begin{aligned}
 S_{яч} &= f_{яч} - \frac{\pi}{4} \cdot (n_{ТВЭЛ} \cdot d_{нар}^2 + n_{НК} \cdot d_{НК}^2 + n_{ЦТ} \cdot d_{ЦТ}^2) = \\
 &= 0,048644 - \frac{\pi}{4} \cdot (312 \cdot 9,1^2 + 18 \cdot 12,6^2 + 1 \cdot 13,0^2) \cdot 10^{-6} = \\
 &= 0,026 \text{ м}^2.
 \end{aligned}$$

При продольном обтекании пучка ТВЭЛОВ в качестве характерного размера используют гидравлический диаметр бесконечной решетки стержней

(ТВЭЛОВ). Гидравлический диаметр бесконечной решетки в случае правильной треугольной решетки равен:

$$d_r = d_{\text{нар}} \left(\frac{2 \cdot \sqrt{3} \cdot x^2}{\pi} - 1 \right) = 9,1 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{2 \cdot \sqrt{3} \cdot 1,401^2}{\pi} - 1 \right) = 0,0106 \text{ м,}$$

где $x = a/d_{\text{нар}} = 12,75/9,1 = 1,401$ – относительный шаг.

1.4.3 Определение параметров теплоносителя

Расход теплоносителя:

$$G = \frac{N_T}{h_{\text{ВЫХ}} - h_{\text{ВХ}}} = \frac{1928 \cdot 1000}{1464 - 1300} = 11757 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Стоит упомянуть, что в прототипном реакторе расход теплоносителя составляет $84800 \text{ м}^3/\text{ч}$, что равнозначно $23555,6 \text{ кг/с}$.

Тепловой поток по высоте активной зоны симметричен, следовательно, температуру в центральном сечении определим, как среднеарифметическое значение температуры на входе и на выходе из активной зоны.

$$t_{\text{ср}} = \frac{t_{\text{ВХ}} + t_{\text{ВЫХ}}}{2} = \frac{293 + 322}{2} = 307,5^\circ\text{C}.$$

Плотность теплоносителя при средней температуре:

$$\rho_{\text{ср}} = f(16 \text{ МПа}; 307,5^\circ\text{C}) = 712 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

Используя уравнение неразрывности, можно определить скорость, с которой теплоноситель движется вдоль пучка ТВЭЛОВ. Средняя скорость теплоносителя в активной зоне:

$$w = \frac{G}{S_{\text{ЯЧ}} \cdot n_{\text{ЯЧ}} \cdot \rho_{\text{ср}}} = \frac{11757}{0,026 \cdot 127 \cdot 712} = 5 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

В реакторах ВВЭР ограничивается величина предельной скорости теплоносителя. По условиям возникновения вибрации ТВЭЛОВ в ТВС и недопустимых динамических нагрузок на элементы конструкции активной

					ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		60

зоны она не должна превышать 5,5...7 м/с. В прототипном реакторе скорость составляет 5,7 м/с.

1.4.4 Теплотехнический расчет

Целью подраздела является проверка проектируемого реактора на теплотехническую надежность. Последнее является свойством реактора в течение заданного времени сохранять нормальный теплоотвод от ТВЭЛОВ. Для большинства реакторов с водой в качестве теплоносителя основным и, как правило, единственным ограничением является минимальный запас до кризиса теплообмена в канале, который на современном уровне точности расчетных методик оценивается величиной $k_{\text{зап}}^{\text{мин}} \geq 1,2 \dots 1,3$. Сам коэффициент определяется величиной критического теплового потока, который следует вычислить.

Эффективная высота активной зоны учитывает влияние отражателя, благодаря которому значительно уменьшается утечка нейтронов из активной зоны. С применением отражателя есть возможность уменьшить критические размеры активной зоны. Эффективную добавку принимаем по прототипу $\delta_{\text{эф}} = 0,08$ м [3, с.323].

Тогда высота с учетом эффективной добавки:

$$H = H_0 + 2 \cdot \delta_{\text{эф}} = 3,73 + 2 \cdot 0,08 = 3,89 \text{ м.}$$

Рассчитаем аксиальный коэффициент неравномерности [3, с.146]:

$$k_z = \frac{\pi \cdot H_0}{2 \cdot H \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot H_0}{2 \cdot H}\right)} = \frac{\pi \cdot 3,73}{2 \cdot 3,89 \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot 3,73}{2 \cdot 3,89}\right)} = 1,509.$$

Остальные коэффициенты неравномерности принимаем для ВВЭР-1000 на начало кампании [4, с.163].

$k_r k_E = 1,35$ – радиальный коэффициент, учитывающий кассеты с различным обогащением или различной глубиной выгорания;

$k_T = 1,15$ – коэффициент, учитывающий неравномерность энерговыделения по ТВС.

					ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		61

Тогда коэффициент неравномерности по объему активной зоны определится следующим образом:

$$k_v = k_z k_r k_E k_T = 1,509 \cdot 1,35 \cdot 1,15 = 2,343.$$

В дальнейшем будем вести расчеты только для максимально нагруженного твэла. Линейный тепловой поток максимально нагруженного твэла в центральном сечении:

$$q_{l0}^{max} = \frac{N_T \cdot k_v}{H_0 \cdot n_{яч} \cdot n_{ТВЭЛ}} = \frac{1928 \cdot 1000 \cdot 2,343}{3,73 \cdot 127 \cdot 312} = 30,56 \frac{\text{кВт}}{\text{м}}.$$

Плотность теплового потока:

$$q_{s0}^{max} = \chi \frac{q_{l0}^{max}}{\pi \cdot d_{нар}} = 0,94 \frac{30,56}{\pi \cdot 9,1 \cdot 10^{-3}} = 1004,9 \frac{\text{кВт}}{\text{м}^2},$$

где $\chi = 0,94$ коэффициент, учитывающий энерговыделение в твэле [3, с.161].

Расход теплоносителя в расчете на один твэл:

$$g = \frac{G}{n_{яч} \cdot n_{ТВЭЛ}} = \frac{11757}{127 \cdot 312} = 0,3 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Рассчитаем коэффициент теплоотдачи. Критерий Нуссельта – есть безразмерный коэффициент теплоотдачи, определяется с помощью эмпирических формул. Для пучка стержней в треугольной упаковке справедлива формула [5, с.55]:

$$Nu = A Re^{0,8} Pr^{0,4},$$

где

$$\begin{aligned} A &= 0,0165 + 0,02 \cdot (1 - 0,91 \cdot x^{-2}) \cdot x^{0,15} \\ &= 0,0165 + 0,02 \cdot (1 - 0,91 \cdot 1,401^{-2}) \cdot 1,401^{0,15} = 0,028. \end{aligned}$$

Теплофизические свойства воды по средней температуре:

$$\nu = f(16 \text{ МПа}; 307,5^\circ\text{C}) = 1,2 \cdot 10^{-7} \frac{\text{м}^2}{\text{с}};$$

$$Pr = f(16 \text{ МПа}; 307,5^\circ\text{C}) = 0,885;$$

$$\lambda = f(16 \text{ МПа}; 307,5^\circ\text{C}) = 0,547 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}},$$

где ν – коэффициент кинематической вязкости; Pr – критерий Прандтля; λ – коэффициент теплопроводности.

Число Рейнольдса:

$$Re = \frac{d_r \cdot w}{\nu} = \frac{0,0106 \cdot 5}{1,2 \cdot 10^{-7}} = 441970.$$

Число Нуссельта:

$$Nu = 0,028 \cdot 441970^{0,8} \cdot 0,885^{0,4} = 869.$$

Коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{d_r} = \frac{869 \cdot 0,547}{0,0106} = 44841 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}.$$

После вычисления коэффициента теплоотдачи можно найти значение температуры поверхности твэла. Тепловой периметр твэла:

$$\Pi_{\text{твэла}} = \pi \cdot d_{\text{нар}} = \pi \cdot 9,1 \cdot 10^{-3} = 0,0286 \text{ м.}$$

Температурный перепад между наружной поверхностью оболочки твэла и теплоносителем:

$$\Delta T_{\alpha} = \chi \frac{q_{\text{lo}}^{\text{max}}}{\Pi_{\text{твэла}} \cdot \alpha} = 0,94 \frac{30,56 \cdot 1000}{0,0286 \cdot 44841} = 22,4^{\circ}\text{C}.$$

Температура наружной поверхности оболочки твэла:

$$T_{\text{об.нар}} = T_{\text{ср}} + \Delta T_{\alpha} = 307,5 + 22,4 = 330^{\circ}\text{C}.$$

Температура наружной поверхности оболочки твэла не превышает предельно допустимую температуру, при которой интенсивно начинается протекать паро-циркониевая реакция и ухудшается прочность $T = 400^{\circ}\text{C}$ [3, с.34]. Дальнейший расчет будет итерационным, поэтому лучше его автоматизировать. Примем в начальном приближении среднюю температуру оболочки твэла:

$$T_{\text{об}} = 350^{\circ}\text{C}.$$

Толщину оболочки твэла принимаем по прототипу [2, с.540]:

$$\delta_{\text{об}} = 0,57 \text{ мм.}$$

Коэффициент теплопроводности для сплава Э-110 можно найти по аппроксимационной формуле [6, с.160].

					ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		63

$$\lambda_{об} = 23,5 - 0,0192 \cdot (T_{об} + 273,15) + 1,68 \cdot 10^{-5} \cdot (T_{об} + 273,15)^2 =$$

$$= 23,5 - 0,0192 \cdot (350 + 273,15) + 1,68 \cdot 10^{-5} \cdot (350 + 273,15)^2 = 18,06 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$$

Средний диаметр оболочки:

$$d_{об} = d_{нар} - \delta_{об} = 9,1 - 0,57 = 8,53 \text{ мм.}$$

Температура внутренней поверхности оболочки твэла:

$$T_{об.вн} = T_{об.нар} + \chi \frac{q_{l0}^{max} \cdot \delta_{об}}{\pi \cdot d_{об} \cdot \lambda_{об}} = 330 + 0,94 \frac{30,56 \cdot 1000 \cdot 0,57 \cdot 10^{-3}}{\pi \cdot 8,53 \cdot 10^{-3} \cdot 18,06} = 364^{\circ}\text{C.}$$

Проверяем среднюю температуру оболочки твэла:

$$T_{об} = \frac{T_{об.нар} + T_{об.вн}}{2} = \frac{330 + 364}{2} = 347^{\circ}\text{C.}$$

Принятое значение температуры практически совпадает с полученным, следовательно, расчет верный. В дальнейшем, при итерациях следует вычислять погрешность, которая не должна превышать 1%. Переходим к вычислению характерных температур таблеток диоксида урана.

Диаметр топливного сердечника принимаем $d_c = 7,8 \text{ мм}$ [2, с.540].

Диаметр внутренней стенки оболочки:

$$d_{вн} = d_{нар} - 2 \cdot \delta_{об} = 9,1 - 2 \cdot 0,57 = 7,96 \text{ мм.}$$

Величина газового зазора:

$$\delta_{гз} = \frac{d_{вн} - d_c}{2} = \frac{7,96 - 7,8}{2} = 0,08 \text{ мм.}$$

Отношение величины газового зазора к внутреннему диаметру оболочки:

$$\frac{\delta_{гз}}{d_{вн}} \cdot 100\% = \frac{0,08}{7,96} \cdot 100\% = 1,005\%.$$

Коэффициент проводимости контактного слоя определим по рисунку.

					ФЮРА.XXXXXXX.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		64

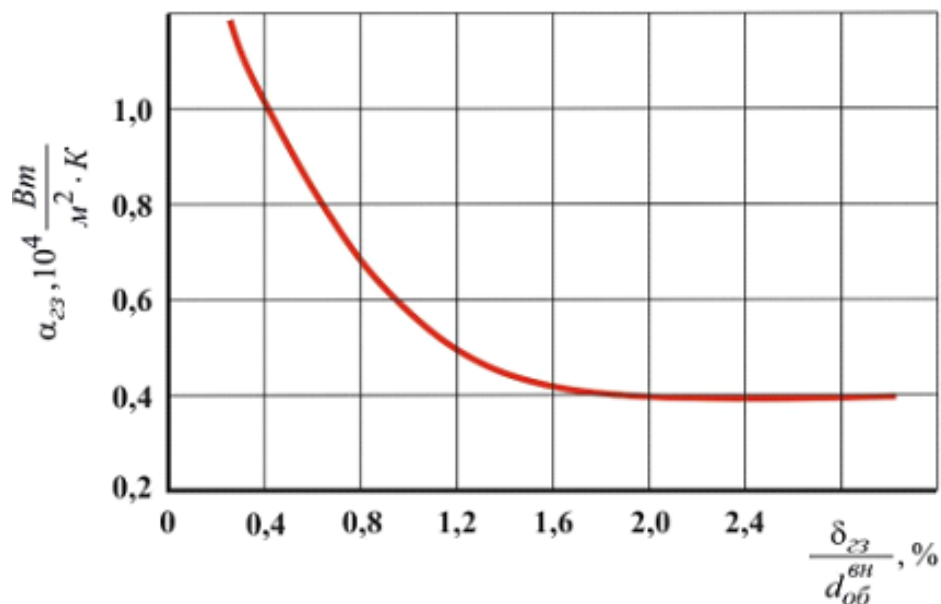


Рисунок 1.4.3 – Зависимость проводимости контактного слоя от отношения первоначального газового зазора к внутреннему диаметру

Из рисунка 1.4.3: $\alpha_{гз} = 0,57 \cdot 10^4 \frac{Вт}{м^2 \cdot К}$.

Температура наружной поверхности топливного сердечника:

$$T_{с.нар} = T_{об.вн} + \chi \frac{q_{l0}^{max}}{\pi \cdot d_c \cdot \alpha_{гз}} = 364 + 0,94 \frac{30,56 \cdot 1000}{\pi \cdot 7,8 \cdot 10^{-3} \cdot 0,57 \cdot 10^4} = 569 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Температуру на внутренней поверхности сердечника в первом приближении примем $T_{с.вн} = 1200^\circ\text{C}$. Эффективная температура топлива:

$$T_c = T_{с.нар} + 0,4 \cdot (T_{с.вн} - T_{с.нар}) = 569 + 0,4 \cdot (1200 - 569) = 822^\circ\text{C}.$$

Теплопроводность диоксида урана с плотностью 95% от теоретической найдем по аппроксимационной формуле [6, с.40]:

$$\begin{aligned} \lambda_c &= \frac{100}{7,5408 + 17,692 \cdot \tau + 3,6142 \cdot \tau^2} \\ &\quad + \frac{6400}{\tau^2} \exp\left(-\frac{16,35}{\tau}\right) = \\ &= \frac{100}{7,5408 + 17,692 \cdot 1,23 + 3,6142 \cdot 1,23^2} \\ &\quad + \frac{6400}{1,23^2} \exp\left(-\frac{16,35}{1,23}\right) = 3,2 \frac{Вт}{м^2 \cdot К}, \end{aligned}$$

где

$$\tau = \frac{T_c + 273,15}{1000} = 1,09 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Диаметр центрального отверстия принимаем $d_0 = 1,2 \text{ мм}$ [2, с.540].

Температура внутренней поверхности топливного сердечника:

$$\begin{aligned} T_{\text{с.вн}} &= T_{\text{с.нар}} + \chi \frac{q_{l0}^{\text{max}}}{4 \cdot \pi \cdot \lambda_c} \cdot \left[1 - \frac{2 \cdot d_0^2}{d_c^2 - d_0^2} \cdot \ln \left(\frac{d_c}{d_0} \right) \right] \\ &= 569 + 0,94 \frac{30,56 \cdot 1000}{4 \cdot \pi \cdot 3,2} \cdot \left[1 - \frac{2 \cdot 1,2^2}{7,8^2 - 1,2^2} \cdot \ln \left(\frac{7,8}{1,2} \right) \right] \\ &= 1218 \text{ } ^\circ\text{C}. \end{aligned}$$

Пересчитываем эффективную температуру топливного сердечника:

$$T_c = T_{\text{с.нар}} + 0,4 \cdot (T_{\text{с.вн}} - T_{\text{с.нар}}) = 569 + 0,4 \cdot (1218 - 569) = 829 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Отклонение пересчитанной температуры от принятой в первом приближении:

$$\Delta = \left| \frac{829 - 822}{829} \right| \cdot 100\% = 0,89\% < 1\%.$$

Отклонение принятого значения от пересчитанного меньше допустимого, следовательно, расчет приемлемый.

Температура на внутренней поверхности топливного сердечника не превышает температуру, при которой начинается интенсивный выход газообразных продуктов деления из топливной таблетки $T = 2600 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Тепловой поток, при котором происходит переход от пузырькового режима кипения к пленочному, называется критическим. Для водоохлаждаемых реакторов, давление теплоносителя в которых превосходит значение 10 МПа, критический поток можно определить по следующей формуле [3, с.238]:

$$q_{\text{кр}} = \frac{0,131 \cdot (1 - 0,286X)^{\frac{1}{3}}}{42 \cdot \left(1 + \frac{H_0}{3,54} \right)} \cdot r \rho' \left[g d_{\Gamma} (g a')^{\frac{1}{3}} \right]^{\frac{1}{3}} \cdot (Pr')^{\frac{1}{3}} \cdot Re^{\frac{1}{5}},$$

$$\text{где } X = x \left(\frac{(\rho w)^2 d_{\Gamma}}{\rho' \sigma} \right)^{\frac{1}{5}}, Re = \frac{\rho w d_{\Gamma}}{\mu'}.$$

					ФЮРА.XXXXXX.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		66

Параметры теплоносителя определим с помощью термодинамических таблиц:

$$\sigma = f(16 \text{ МПа}) = 4,17 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Н}}{\text{м}}; \rho' = f(16 \text{ МПа}) = 585 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3};$$

$$a' = f(16 \text{ МПа}) = 79,97 \cdot 10^{-9} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}; r = f(16 \text{ МПа}) = 931 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}};$$

$$Pr' = f(16 \text{ МПа}) = 1,433; \mu' = f(16 \text{ МПа}) = 6,706 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с};$$

$$h' = f(16 \text{ МПа}) = 1650 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}; h = f(16 \text{ МПа}; 307,5^\circ\text{C}) = 1379 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Относительная энтальпия:

$$x = \frac{h - h'}{r} = \frac{1379 - 1650}{931} = -0,29.$$

Массовая скорость:

$$\rho w = 712 \cdot 5 = 3563 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}.$$

Обобщенное массовое паросодержание:

$$X = x \left(\frac{(\rho w)^2 d_\Gamma}{\rho' \sigma} \right)^{\frac{1}{5}} = -0,29 \cdot \left(\frac{3563^2 \cdot 0,0106}{585 \cdot 4,17 \cdot 10^{-3}} \right)^{\frac{1}{5}} = -2,584.$$

Число Рейнольдса:

$$Re = \frac{\rho w \cdot d_\Gamma}{\mu'} = \frac{3563 \cdot 0,0106}{6,706 \cdot 10^{-5}} = 563107.$$

Критическая плотность теплового потока:

$$q_{\text{кр}} = \frac{0,131 \cdot (1 - 0,286X)^{\frac{1}{3}}}{42 \cdot \left(1 + \frac{H_0}{3,54}\right)} \cdot r \rho' \left[g d_\Gamma (g a')^{\frac{1}{3}} \right]^{\frac{1}{3}} \cdot (Pr')^{\frac{1}{3}} \cdot Re^{\frac{1}{5}}$$

$$= \frac{0,131 \cdot (1 - 0,286 \cdot (-2,584))^{\frac{1}{3}}}{42 \cdot \left(1 + \frac{3,73}{3,54}\right)} \cdot 931 \cdot 585$$

$$\cdot \left[9,81 \cdot 0,0106 \cdot (9,81 \cdot 7,997 \cdot 10^{-8})^{\frac{1}{3}} \right]^{\frac{1}{3}} \cdot (1,433)^{\frac{1}{3}} \cdot 666928^{\frac{1}{5}}$$

$$= 1561,8 \frac{\text{кВт}}{\text{м}^2}.$$

					ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		67

Коэффициент запаса до кризиса:

$$k_{\text{зап}} = \frac{q_{\text{кр}}}{q_{s0}^{\text{max}}} = \frac{1561.8}{1004,4} = 1,55.$$

Коэффициент запаса до кризиса выше минимально допустимого $k_{\text{зап}} = 1,2 \div 1,3$, а это значит, что активная зона отвечает требованиям теплотехнической надежности, в расчете на среднюю температуру теплоносителя.

1.4.5 Расчет параметров по высоте активной зоны

Линейный тепловой поток по высоте твэла изменяется в соответствии с косинусоидальным законом:

$$q_l(z) = q_{l0} \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot z}{H}\right).$$

Теплота, переданная теплоносителю по высоте z :

$$Q_{\text{ТВЭЛ}}(z) = \frac{q_{l0} \cdot H}{\pi} \cdot \left(\sin\left(\frac{\pi \cdot z}{H}\right) + \sin\left(\frac{\pi \cdot H_0}{2 \cdot H}\right) \right).$$

Энтальпия теплоносителя и относительная энтальпия на высоте z :

$$h(z) = h_{\text{вх}} + \frac{Q_{\text{ТВЭЛ}}(z)}{g}, \quad x(z) = \frac{h(z) - h'}{r}.$$

Скорость в любой точке по высоте z :

$$w_{\text{ТН}}(z) = \frac{g \cdot n_{\text{ТВЭЛ}}}{s_{\text{ЯЧ}} \cdot \rho(z)},$$

Произведем условное разбиение высоты активной зоны на 8 участков, соответственно 9 ключевых точек. Вычислим в этих точках необходимые параметры, присущие максимально нагруженному твэлу и среднему твэлу. Результаты отобразим в таблицах.

Напомним, что линейный тепловой поток в центральном сечении максимально нагруженного твэла равен:

$$q_{l0}^{\text{max}} = \frac{N_{\text{Т}} \cdot k_{\nu}}{H_0 \cdot n_{\text{ЯЧ}} \cdot n_{\text{ТВЭЛ}}} = \frac{1928 \cdot 1000 \cdot 2,343}{3,73 \cdot 127 \cdot 312} = 30,56 \frac{\text{кВт}}{\text{м}}.$$

									Лист
									68
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата					

Таблица 1.4.2 – Результаты расчётов на максимально напряженный твэл

Высота	q_l	x	$w_{ТН}$	$T_{ТН}$	$T_{об.нар}$	$T_{с.нар}$	$T_{с.вн}$
	кВт/м	–	м/с	°С			
0	2,0	-0,38	4,81	293	295	310	343
H/8	13,0	-0,36	4,84	295	305	407	610
2H/8	22,3	-0,33	4,91	301	317	492	900
3H/8	28,4	-0,29	5,01	308	329	551	1130
4H/8	30,6	-0,24	5,15	316	338	578	1250
5H/8	28,4	-0,19	5,30	324	344	566	1150
6H/8	22,3	-0,15	5,45	330	345	520	920
7H/8	13,0	-0,12	5,56	334	343	445	640
8H/8	2,0	-0,10	5,61	336	337	352	370

Для средненагруженного твэла расчет выполняется аналогично. Разница будет лишь в определении линейного теплового потока в центральном сечении:

$$q_{l0} = \frac{N_T \cdot k_z}{H_0 \cdot n_{яч} \cdot n_{ТВЭЛ}} = \frac{1928 \cdot 1000 \cdot 1,502}{3,73 \cdot 127 \cdot 312} = 19,7 \frac{\text{кВт}}{\text{м}}$$

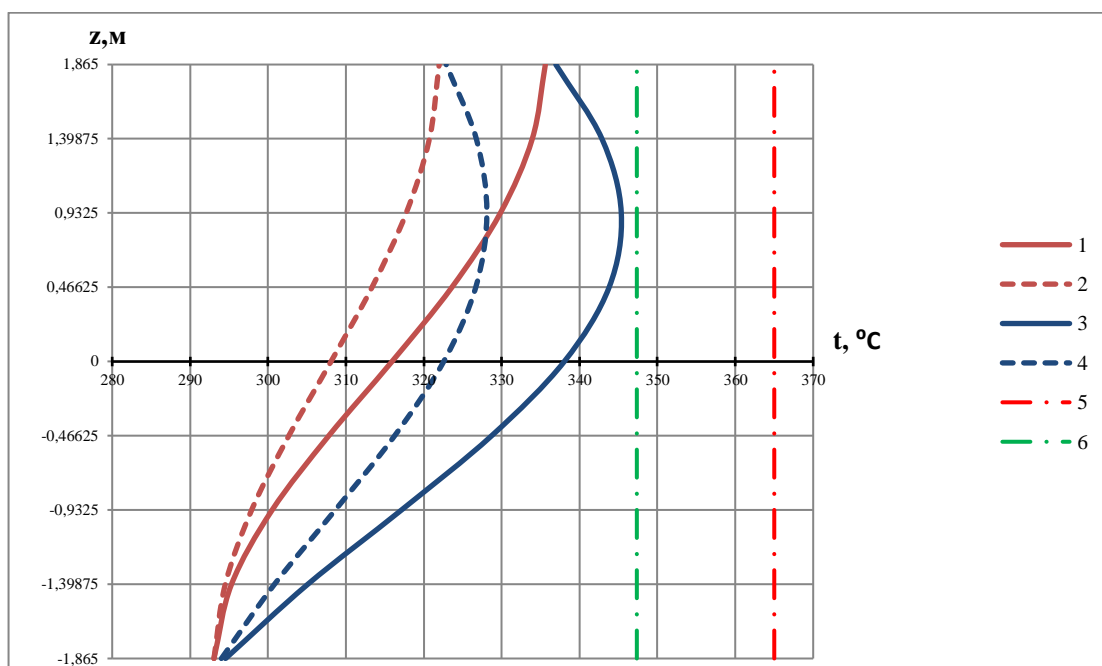
Таблица 1.4.3 – Результаты расчётов на средний твэл

Высота	q_l	x	$w_{ТН}$	$T_{ТН}$	$T_{об.нар}$	$T_{с.нар}$	$T_{с.вн}$
	кВт/м	–	м/с	°С			
0	1,3	-0,38	4,81	293	294	304	324
H/8	8,4	-0,37	4,83	295	301	367	492
2H/8	14,4	-0,35	4,87	298	309	421	668
3H/8	18,3	-0,32	4,94	303	316	460	770
4H/8	19,7	-0,29	5,02	308	323	477	850
5H/8	18,3	-0,26	5,10	313	327	470	810
6H/8	14,4	-0,23	5,18	318	328	441	690
7H/8	8,4	-0,21	5,24	321	327	393	520
8H/8	1,3	-0,20	5,27	322	323	333	355

Таблица 1.4.4 – Результаты расчётов тепловых потоков

Высота	q_s^{max}	q_s^{cp}	$q_{кр}^{max}$	$q_{кр}^{cp}$	$k_{зап}^{max}$	$k_{зап}^{cp}$
	кВт/м ²		кВт/м ²		—	—
0	64,9	41,8	1526,3	1526,3	23,526	36,524
H/8	429,1	276,4	1520,7	1522,7	3,5443	5,5097
2H/8	733,1	472,2	1507,1	1514,1	2,0556	3,2062
3H/8	934,5	601,9	1486,2	1501,1	1,5904	2,4939
4H/8	1004,9	647,3	1459,9	1485,3	1,4528	2,2947
5H/8	934,5	601,9	1431,3	1468,6	1,5317	2,4398
6H/8	733,1	472,2	1404,7	1453,5	1,916	3,0779
7H/8	429,1	276,4	1384,9	1442,5	3,2278	5,2195
8H/8	64,9	41,8	1376,2	1437,8	21,212	34,404

1.4.6 Построение графиков и анализ результатов



- Рисунок 1.4.4 – Распределение характерных температур по высоте канала:
- 1) – Температура теплоносителя в расчете на максимально нагруженный ТВЭЛ;
 - 2) – Температура теплоносителя в расчете на среднюю тепловую нагрузку;
 - 3) – Температура наружной поверхности оболочки ТВЭла в расчете на максимально нагруженный ТВЭЛ;
 - 4) – Температура наружной поверхности оболочки ТВЭла в расчете на среднюю тепловую нагрузку;
 - 5) – Предельная температура теплоносителя на выходе и предельная температура поверхности оболочки ТВЭла;
 - 6) – Температура насыщения теплоносителя.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ

Лист

71

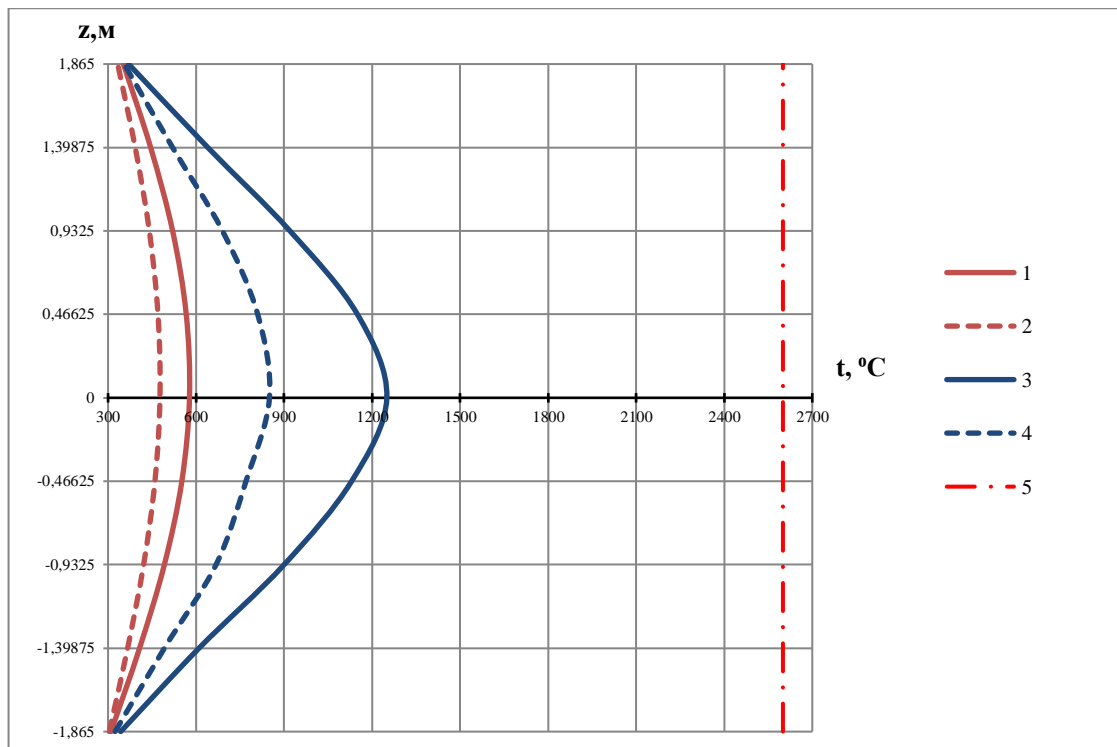


Рисунок 1.4.5 – Распределение характерных температур топливной композиции по высоте канала:

- 1) – Температура наружной поверхности топливного сердечника в расчете на максимально нагруженный ТВЭЛ;
- 2) – Температура наружной поверхности топливного сердечника в расчете на среднюю тепловую нагрузку;
- 3) – Температура внутренней поверхности сердечника в расчете на максимально нагруженный ТВЭЛ;
- 4) – Температура внутренней поверхности сердечника в расчете на среднюю тепловую нагрузку;
- 5) – Предельная температура топливного сердечника.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ

Лист

72

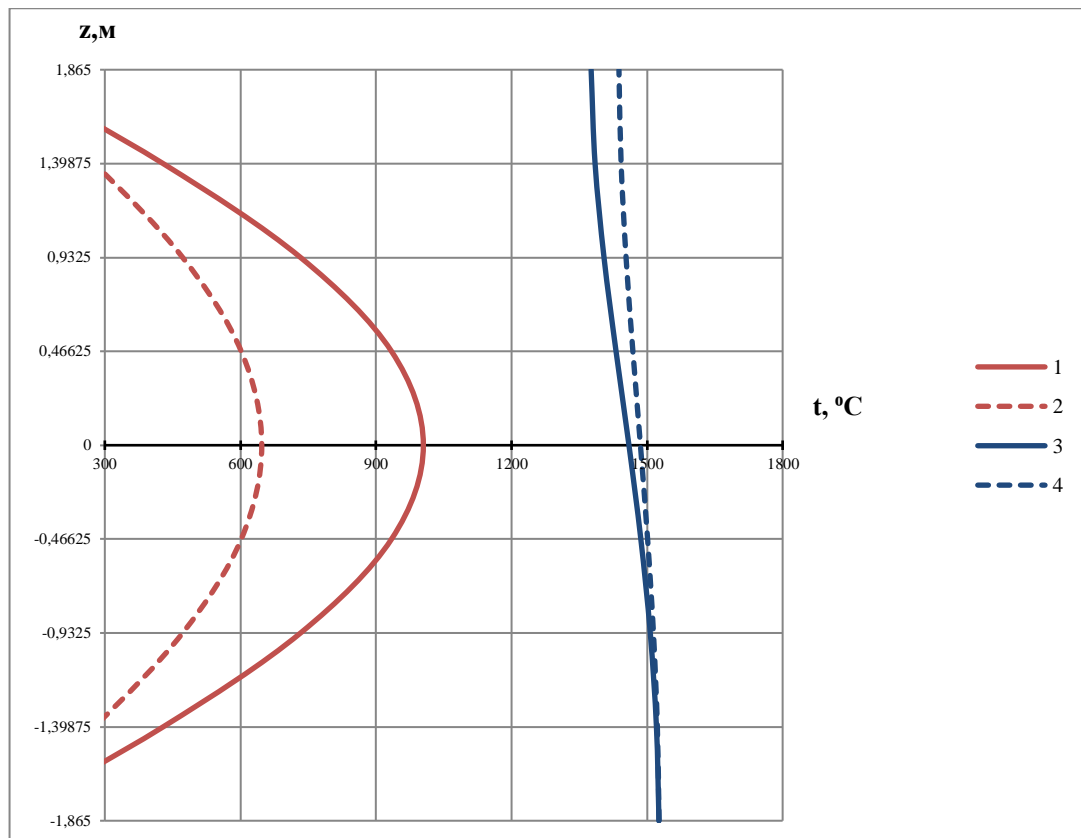


Рисунок 1.4.6 – Распределение тепловых потоков по высоте канала:

- 1) – Удельный тепловой поток в расчете на максимально нагруженный твэл;
- 2) – Удельный тепловой поток в расчете на среднюю тепловую нагрузку;
- 3) – Критический тепловой поток в расчете на
максимально нагруженный твэл;
- 4) – Критический тепловой поток в
расчете на среднюю тепловую нагрузку.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Выводы:

- Максимальная температура теплоносителя на выходе 316°C значение не превышает пределов $360\text{--}365^{\circ}\text{C}$, обусловленных допустимостью использования циркониевых сплавов в водной среде.

- Максимальное значение линейного теплового потока составляет 306 Вт/см , которое не превышает предельные 500 Вт/см (50 кВт/м).

- По всей высоте наблюдаются отрицательные значения относительной энтальпии, что свидетельствует о том, что кипение отсутствует. Отсутствие поверхностного кипения подтверждает так же тот факт, что на рисунке 1.4.4 линия 3 не пересекает линию 6.

- Максимальное значение скорости теплоносителя составляет $5,15\text{ м/с}$, которое не превышает предельные 7 м/с , обусловленные возникновением вибраций.

- Максимальная температура наружной поверхности оболочки 345°C , так же не превышает пределов $360\text{--}365^{\circ}\text{C}$, обусловленных допустимостью использования циркониевых сплавов в водной среде.

- Максимальная температура внутренней поверхности топливного сердечника составляет 1250°C , не превышающая предельной температуры керамического топлива 2600°C .

- Минимальный запас до кризиса теплообмена в максимально нагруженном канале составляет $23,5\%$, что лежит в допустимых пределах $20\text{--}30\%$.

По всем показателям активная зона отвечает требованиям теплотехнической надежности.

					<i>ФЮРА.XXXXXXX.001 ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		74

2 Автоматический контроль и регулирование деаэратора

2.1 Краткое описание технологического оборудования

Выбран следующий узел: деаэратор продувочной воды (ДПВ) системы продувки-подпитки первого контура реакторной установки. ДПВ атмосферного давления, пленочного типа. Деаэратор расположен в помещении обстройки реакторного отделения и предназначен для дегазации подпиточной воды. Деаэратор состоит из вертикального бака-аккумулятора со встроенным подогревателем и деаэрационной колонкой, установленной на баке. Внутри деаэрационной колонки установкой соответствующих перегородок и распределительных тарелок организованы главная и периферийная распределительная камеры, центральная и кольцевая струйные камеры, малая и большая насадочные колонны.

Внутри бака-аккумулятора установлены перегородки для организации потоков среды. В нижней части бака-аккумулятора расположен трубный пучок встроенного подогревателя, выполненный из 179 U-образных трубок, закрепленных в трубной доске. Материал колонки, корпуса и трубной части - сталь 08X18H10T. Изготавливался деаэратор Барнаульским котельным заводом.

Схема деаэратора показана на рисунке. В связи с широким диапазоном нагрузок деаэратора внутри деаэрационной колонки организованы два самостоятельных контура циркуляции для больших и малых потоков.

В каждый контур входят распределительная и струйная камеры и насадочная колонна. Режим работы с расходом до 9 м³/час обеспечивается работой малой насадочной колонны, а с большим расходом – работой обеих насадочных колонн.

Таким образом, при малых нагрузках в работе находятся центральные распределительная 3 и струйная 5 камеры и насадочная колонна 7.

					ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		75

При полной нагрузке в работу включаются также периферийные распределительная 4 и струйная 6 камеры и насадочная колонна 8. Весь поток деаэрируется, проходя мелкими струйками через струйные камеры и насадочные колонны. Керамические насадки в дополнение к струям обеспечивают равномерность контакта деаэрируемой воды и пара. Поэтому деаэратор обеспечивает хорошую деаэрацию при любой нагрузке.

Стекающая из деаэрационной колонны вода по козырьку направляется в опускной участок внутренней полости бака-аккумулятора, барботируется паром, проходит трубный пучок и выходит во внешнюю полость.

Для подогрева и деаэрации теплоносителя используется пар, генерируемый из воды, находящейся в баке-аккумуляторе. Нагревателем воды служит трубный пучок, в который поступает пар от редуцированной установки машзала. Высокая степень дегазации и предотвращение повторного растворения в воде выделившихся из нее газов обеспечивается организованным противоточным движением и постоянным контактом восходящего потока пара и нисходящего потока конденсата: сначала в баке-аккумуляторе, затем в насадочных колоннах и струйных камерах.

Деаэратор обеспечивает снижение содержания:

- водорода не менее, чем в 100 раз;
- радиоактивных благородных газов (РБГ) не менее, чем в 10 раз;
- кислорода не менее, чем в 500 раз.

Поступающие в деаэраторы потоки предварительно подогреваются в теплообменниках. Выпар деаэратора подпитки направляется в систему дожигания водорода. Поддержание давления в деаэраторах осуществляется за счет подачи греющего пара в подогреватель. В случае отсутствия греющего пара и при падении давления в ДП предусмотрена подача азота для разбавления водорода. Выпар ДБР направляется через охладитель выпара в венттрубу блока.

					<i>ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		76

Допустимая скорость разогрева и расхолаживания деаэратора не должна превышать 3 град.С/мин.

Таблица 4.1.1 – Технические характеристики ДПВ

Номинальная производительность, тн/ч	70
Температура деаэрируемой воды, °С	104
Расход выпара при номинальной производительности, кг/ч	150
Производительность в аварийном режиме, тн/ч	100
Рабочее давление, кгс/см ²	1,2
Емкость корпуса геометрическая, м ³	31
Емкость корпуса рабочая, м ³	19
Поверхность теплообмена нагревателя, м ²	53,5
Количество теплообменных труб 18x2.5, шт	179

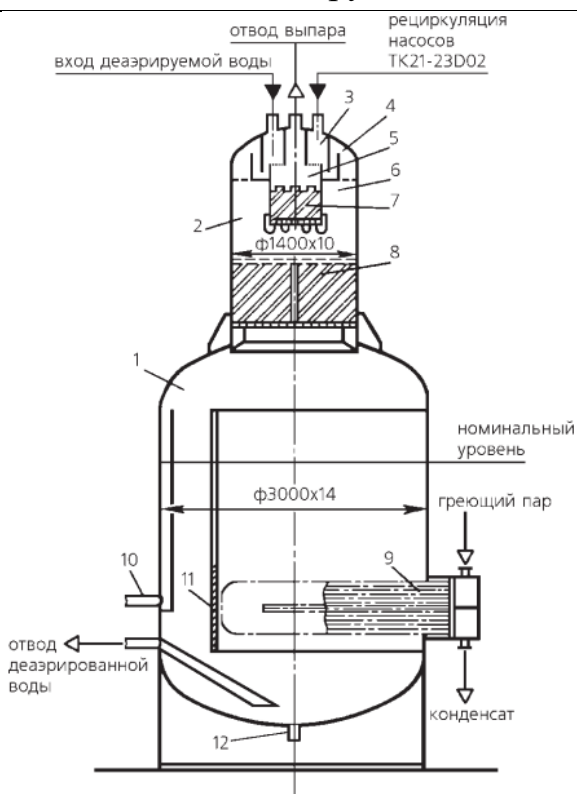


Рисунок 4.1.1 – Конструкция деаэратора подпитки [2]:

- 1 – вертикальный бак; 2 – деаэрационная колонка; 3 – центральная распределительная камера; 4 – периферийная распределительная камера; 5 – центральная струйная камера; 6 – периферийная струйная камера; 7, 8 – посадочные колонны; 9 – теплообменник; 10 – перелив; 11 – глухой щит; 12 – дренаж.

2.2 Постановка задачи АКир

В деаэраторе подразумевается регулирование следующих параметров: уровень воды; давление.

Из атмосферных деаэраторов выпар удаляется под действием небольшого избытка давления над атмосферным (0,12 МПа). В точке кипения растворимость кислорода и углекислого газа в воде равна нулю. Пониженное давление не обеспечит требуемую степень очистки воды от газов. Стоит задача обеспечения состояния насыщения посредством регулирования давления. Решение задачи кроется в воздействии на клапан греющего пара в нагревателе.

Уровень воды в деаэраторе является показателем баланса. Если расход продувочной воды больше расхода подпиточной воды, часть воды сливается в баки боросодержащей воды. Это касается повышенного уровня. Если наоборот, недостаток восполняется дистиллятом. Уровень в деаэраторе подпитки поддерживается регулятором, воздействующим на регулирующий клапан, установленный на линии слива из деаэратора в баки боросодержащей воды.

Из всего вышесказанного следует вывод, что необходима система автоматического контроля и регулирования давления и уровня в деаэраторе.

2.3 Выбор оптимальной схемы АКир

Схема включает в себя объект управления (деаэратор подпиточной воды) и саму систему управления этим объектом. Система состоит из двух компонентов, это измерительная часть и управляющая часть. Канал измерения уровня воды представлен тремя элементами: уравнильный сосуд, преобразователь разности давлений, показывающий прибор. АСУ ТП работает следующим образом. Регулирующее устройство воспринимаем два сигнала: заданный и измеренный. При рассогласовании этот элемент

					<i>ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		78

2.4 Разработка функциональной схемы

Индивидуальное управление регулируемыми органами осуществляется с БЩУ, где располагаются аппаратура выбора режима управления – автоматическое, дистанционное, команд оператора – открыть, закрыть, указатели положения регулирующих органов, а также сигнализация, показывающая по какой программе регулирования работает регулятор.

Аппаратура управления агрегатами и арматурой, кроме отсечной, находятся в индивидуальных для каждого агрегата шкафах, расположенных в неоперативном контуре БЩУ.

Функциональная схема представлена на отдельном формате: [Графический материал, ФЮРА.421000.005 С2].

2.5 Обзор выпускаемых средств измерения и регулирования

Для измерений применяются преобразователи типа «Сапфир-22», для автоматического регулирования применяется аппаратура типа «Каскад-2».

САПФИР-22 — это интеллектуальный датчик давления, который предназначен для использования в атомной промышленности. САПФИР-22 — это современная и выгодная замена традиционных датчиков давления, которые постепенно выходят из употребления.

Электрическое питание преобразователей осуществляется от источника питания постоянного тока напряжением $(36 \pm 0,72)$ В. Рекомендуется использовать блок питания 22 БП-36.

Блоки питания 22БП-36 предназначены для питания стабилизированным напряжением постоянного тока 36 В комплекса тензорезисторных измерительных преобразователей (датчиков) теплоэнергетических параметров «Сапфир».

					ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		80

Комплекс КАСКАД 2 предназначен для регулирования давления, расхода, разрежения, уровня, температуры, мощности, концентрации веществ, скорости перемещения или вращения и других параметров, которые могут быть преобразованы в сигналы постоянного тока.

Комплекс КАСКАД 2 применяется для автоматизации: теплоэнергетических установок (в том числе АЭС), предприятий черной и цветной металлургии, химических заводов, нефтеперерабатывающих комбинатов, заводов, производящих синтетические материалы, пищевые продукты, газонепроводов, электротермических установок, электроприводов постоянного тока и т.д.

Особенности блоков Р27:

- Алгебраическое суммирование (в Р27 с гальваническим разделением) и масштабирование входных сигналов;
- Введение задания, формирование и усиление сигнала отклонения регулируемой величины от заданного значения;
- Формирование аналогового выхода по П-, ПИ- или ПИД-законам регулирования, а также трехпозиционное и двухпозиционное регулирование;
- Индикация выходного сигнала;
- Введение запрета на управление нагрузкой.

2.6 Составление заказной спецификации

Для функциональной схемы составлена заказная спецификация, в которой указаны позиции, наименования и количество требуемых для системы приборов. Документ представлен на отдельном листе: [Спецификация, ФЮРА.421000.005 СО1].

					<i>ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		81

Заключение

В ходе разработки дипломного проекта применены навыки и знания, полученные в процессе обучения. Изучен большой объём отечественной литературы, посвященной атомной и тепловой энергетике. Рассчитана тепловая схема энергоблока с помощью метода относительных расходов. Выбрано тепломеханическое оборудование из каталогов российских производителей оборудования для энергетики. Рассчитаны важнейшие агрегаты: ядерный реактор и парогенератор. Уделено внимание разработке функциональной схемы автоматизированного контроля и управления параметрами деаэратора первого контура.

Для совершенства расчета следует его дополнить. Произвести нейтронно-физический расчет ядерного реактора, который даст уточненное значение эффективной добавки активной зоны. Произвести гидравлические расчеты реактора и парогенератора, для учета потерь давления по ходу движения воды и пара в этих агрегатах. Можно повысить точность путем добавления одного или более знаков в десятичной части численных значений рассчитанных параметров. Уменьшить допускаяемый диапазон погрешностей итерационных расчетов.

Полученные результаты рекомендуются к рассмотрению и сравнению с аналогичными решениями внедрения атомных станций в северные районы Российской Федерации.

					<i>ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		82

Приложение А

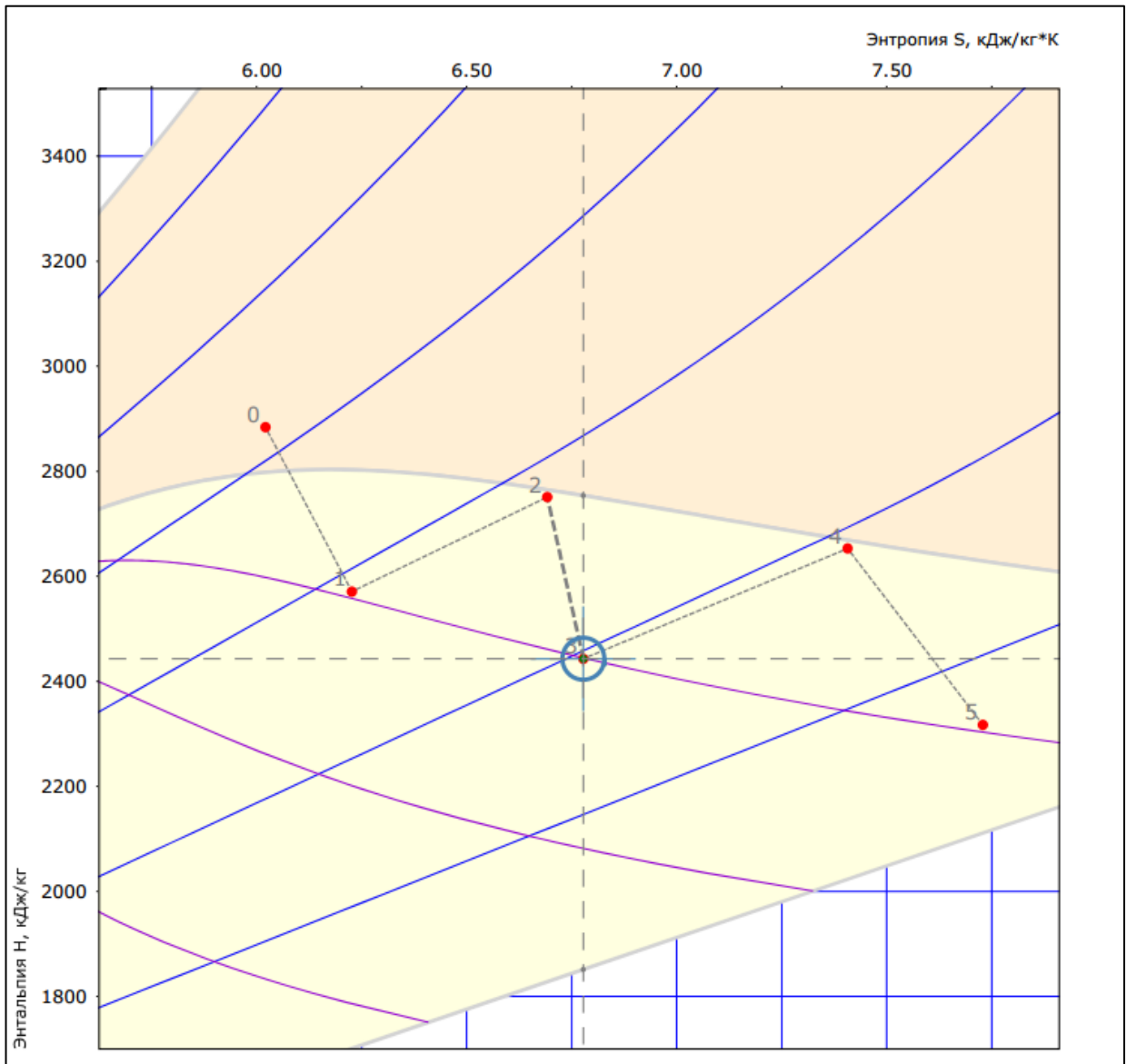


Рисунок А – Действительный процесс расширения пара
в hs -диаграмме

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ФЮРА.XXXXXX.001 ПЗ

Лист

83

Приложение Б

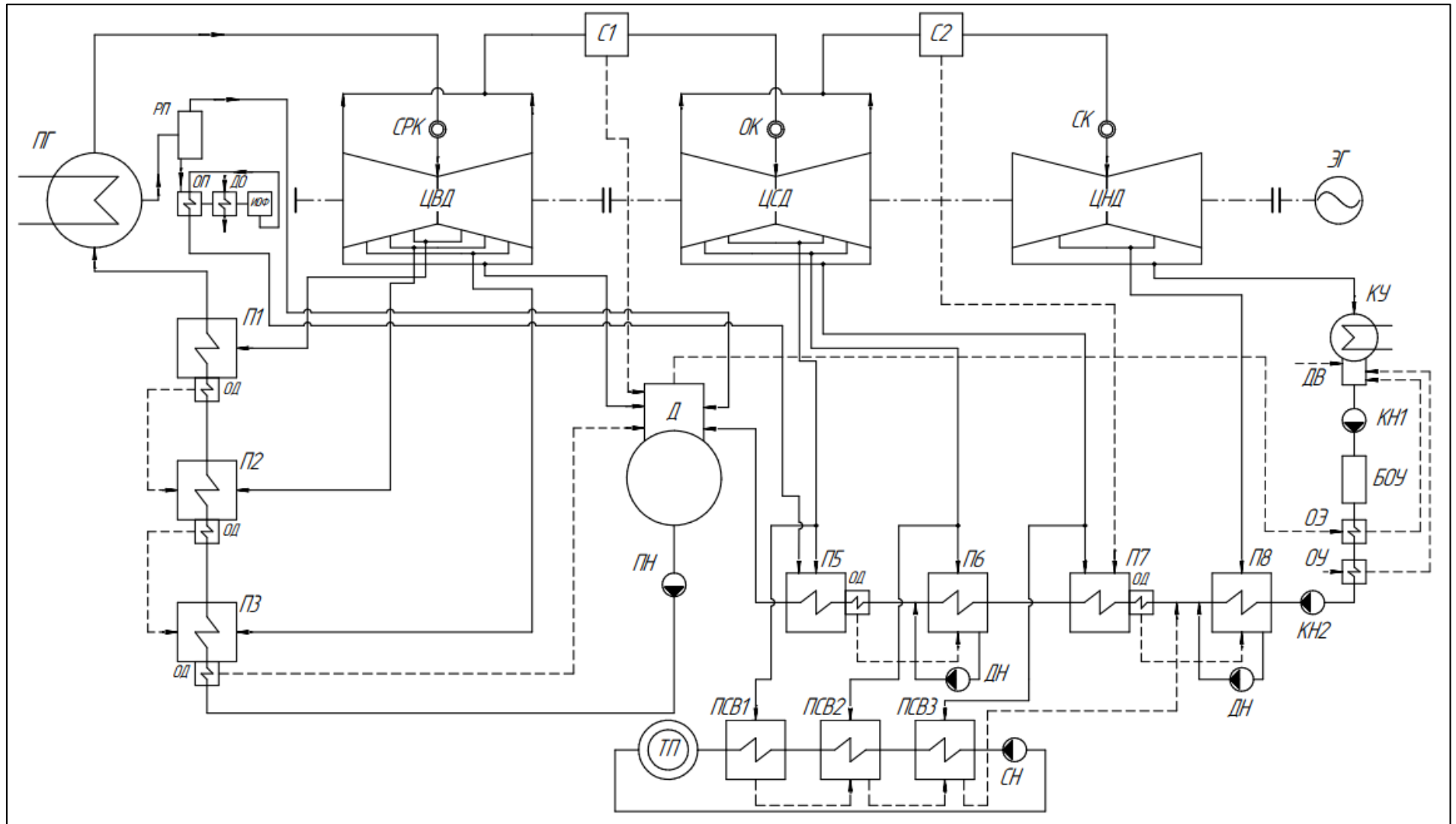


Рисунок Б – Принципиальная тепловая схема проектируемого энергоблока

Приложение В

Таблица В – Параметры пара, конденсата и воды при теплофикационном режиме

Точка процесса в турбине	Элемент тепловой схемы	Пар в турбине (отборе)		Пар в подогревателе	Конденсат греющего пара		Охладитель дренажа		Питательная вода, основной конденсат, сетевая вода			Удельная работа отбора	Коэффициент недовыработки
		$p_{отб}$	$h_{отб}$	$p_{п}$	t_s	h'	$t_{од}$	$h_{од}$	$t_{пв}$	$p_{пв}$	$h_{пв,ок,св}$	H_j	y_j
		МПа	кДж/кг	МПа	°С	кДж/кг	°С	кДж/кг	°С	МПа	кДж/кг	кДж/кг	-
0	-	7	2884	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0'	-	6,79	2884	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1	П1	3,89	2796	3,78	247	1071	230	992	245	9,8	1062	88	0,908
2	П2	2,48	2729	2,41	222	953	205	878	220	9,8	946	155	0,838
3	П3	1,503	2658	1,46	197	839	180	768	195	9,8	834	226	0,764
4	Д (П4)	0,78	2571	0,76	-	-	-	-	168,3	0,76	712	313	0,673
С1	С1	0,757	2751	0,76	197	711	-	-	-	-	-	-	-
5	П5	0,59	2727	0,572	157	663	134,5	566	155	1,14	654	337	0,648
6	П6	0,25	2589	0,243	126,5	531	-	-	124,5	1,14	524	475	0,504
7	П7	0,0904	2443	0,0878	96	402	73,5	309	94	1,14	395	621	0,351
С2	С2	0,0824	2653	0,0878	96	402	-	-	-	-	-	-	-
8	П8	0,0264	2520	0,0256	63,5	274	-	-	63,5	1,04	267	754	0,212
к'	К	0,0036	2317	0,0035	33	139	-	-	33	0,0035	139	957	0
-	ПСВ1	0,59	2727	0,56	156,2	659	-	-	150	1,5	633	337	0,648
-	ПСВ2	0,25	2589	0,237	125,7	528	-	-	120	1,5	505	475	0,504
-	ПСВ3	0,0904	2443	0,086	95,4	400	-	-	90	1,5	378	621	0,351