

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Воронежский государственный технический университет»

Кафедра физики твердого тела

**ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ
АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ**

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

по выполнению курсового проекта для обучающихся по
направлению 14.03.01 «Ядерная энергетика и теплофизика»
профиль «Техника и физика низких температур»
очной формы обучения

Воронеж 2022

УДК ...
ББК ...

Составители:
К. Г. Королев

Основы проектирования оборудования атомных электростанций: методические указания по выполнению курсового проекта для обучающихся по направлению 14.03.01 «Ядерная энергетика и теплофизика» профиль «Техника и физика низких температур» очной формы обучения / ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»; сост.: К.Г. Королев. – Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2022. – 18 с.

В методических указаниях приводятся рекомендации по выполнению курсового проекта по дисциплине «Основы проектирования оборудования атомных электростанций» и основные требования к ее оформлению.

Методические указания подготовлены в электронном виде и содержатся в файле [МУ КП ОПОАЭС.pdf](#).

Табл. 4. Ил. 13. Библиогр.: 5 назв.

УДК ...
ББК ...

Рецензент – В.В. Ожерельев, канд. физ.-мат. наук, доц. кафедры технологии сварочного производства и диагностики ВГТУ

Рекомендовано методическим семинаром кафедры ФТТ и методической комиссией ФРТЭ Воронежского государственного технического университета в качестве методических материалов

1 Методика проектирования

1.1 Техническое задание

Тема проекта:

Расчет параметров тепловой схемы АЭС с промежуточной сепарацией, перегревом пара и регенеративным подогревом конденсата и питательной воды в соответствии с техническим заданием.

Требования:

- выполнить литературный обзор, посвященный оборудованию, входящему в состав расчетной схемы, в том числе конструктивные особенности и принципы работы;
- использовать бесплатную версию программы mini-REFPROP [3] для определения термодинамических параметров;
- разработать с помощью программы mini-REFPROP [3] T-s и h-S диаграммы цикла;
- разработать расчетную математическую модель в компьютерной программе SMATH Studio [4] и оформить в качестве Приложения к документу курсового проекта;
- выполнить чертеж одного из элементов оборудования расчетной тепловой схемы АЭС и составить пояснительную записку.

1.2 Задание на курсовой проект

Персональное техническое задание на курсовой проект уточнить у преподавателя. Расчет необходимо выполнить в компьютерной программе SMATH Studio [4] или Mathcad [5]. Дополнительные требования по оформлению могут быть уточнены у преподавателя.

2 Методика расчета

2.1 Исходные данные

В качестве примера рассмотрим парогенератор АЭС, который вырабатывает пар в количестве D (кг/с), с параметрами P_0 (МПа), и $x_0 = 1,0$.

Индивидуальные значения параметров D и P_0 необходимо уточнить у преподавателя.

В тепловой схеме АЭС за ЧВД турбины установлен сепаратор и паро-паровой перегреватель, на который поступает острый пар с параметрами P_0 , МПа, и $x_0 = 1,0$. Принципиальная тепловая схема представлена на рис. 1.

Давление пара за ЧВД турбины называется разделительным P_p . Это давление равно $P_p = 0,12 * P_0$. Давление в конденсаторе турбины $P_k = 5$ кПа. Недогрев пара за ЧВД в паро-паровом перегревателе $\Delta t_{пп} = 20$ К. Степень сухости пара после сепаратора на входе в паро-паровой перегреватель $x_c = 1,0$.

В регенеративной схеме турбоустановки АЭС поставлены два смешивающих подогревателя П1 и П2. В подогреватель П1 поступает пар после ЧВД турбины при давлении P_p (МПа). В подогреватель П2 поступает пар из ЧНД турбины при давлении $P_2 = P_{2(\text{опт})} = 0,15 * P_p$.

Для приведённой схемы на рис. 1 и идеального цикла определить:

- термический КПД цикла;
- работу, совершаемую паром в турбине;
- количество теплоты, поступающей на совершение работы в машинный зал АЭС,
- расход пара для идеального цикла по всем элементам принципиальной тепловой схемы.

2.2 Методические указания

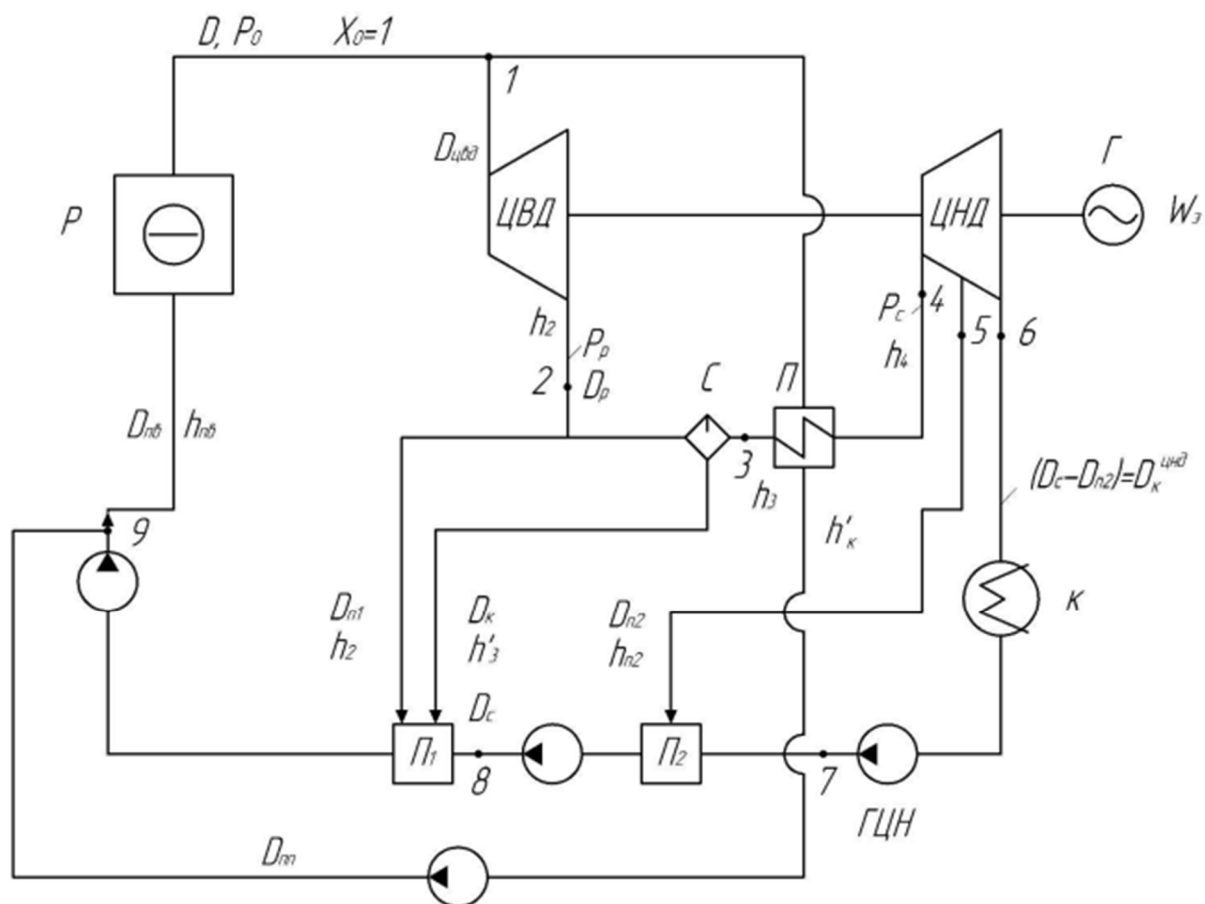
Температура пара перед ЧНД $t_{\text{чнд}} = t_0 - \Delta t_{\text{пп}}$. Пар перед ЧНД перегретый. Сначала строим процесс расширения пара в турбине в h-s и T-s диаграммах. Затем находим расходы пара, идущего в промежуточный перегреватель, П1 и П2. После этого определяем расходы пара по отсекам турбины, полезную работу в цикле и термический КПД.

2.3 Решение

Для примера выберем следующие данные для расчёта принципиальной тепловой схемы (рис. 1):

$$P_0 = 7,0 \text{ МПа}; P_p = 0,12 * P_0 = 0,84 \text{ МПа}; P_k = 5 \text{ кПа}; \Delta t_{\text{пп}} = 20 \text{ К}; \\ \eta_{oi}^{\text{чнд}} = 0,8; \eta_{oi}^{\text{чвд}} = 0,8; \eta_m = 0,98; \eta_r = 0,99; x_0 = x_c = 1,0; D = 500 \text{ кг/с}.$$

Расставим характерные точки на принципиальной тепловой схеме (рис. 1), для которых необходимо определить параметры рабочего тела. Представим цикл блока в h-s и T-s диаграммах и определим параметры в характерных точках (см. рис. 2 и 3).



Р – реактор; ЦВД – цилиндр высокого давления; ЦНД – цилиндр низкого давления; Г – генератор электрического тока; С – сепаратор; П – пароперегреватель; К – конденсатор; П1 и П2 – смешивающие подогреватели; ГЦН – главный циркуляционный насос.

Рисунок 1 - Принципиальная тепловая схема АЭС с промежуточной сепарацией, перегревом пара и регенеративным подогревом конденсата и питательной воды

Индексация для обозначения величин, относящихся к различным состояниям воды и пара:

- величина с индексом «'» относится к воде, нагретой до температуры кипения (насыщения);
- величина с индексом «"» относится к сухому насыщенному пару;

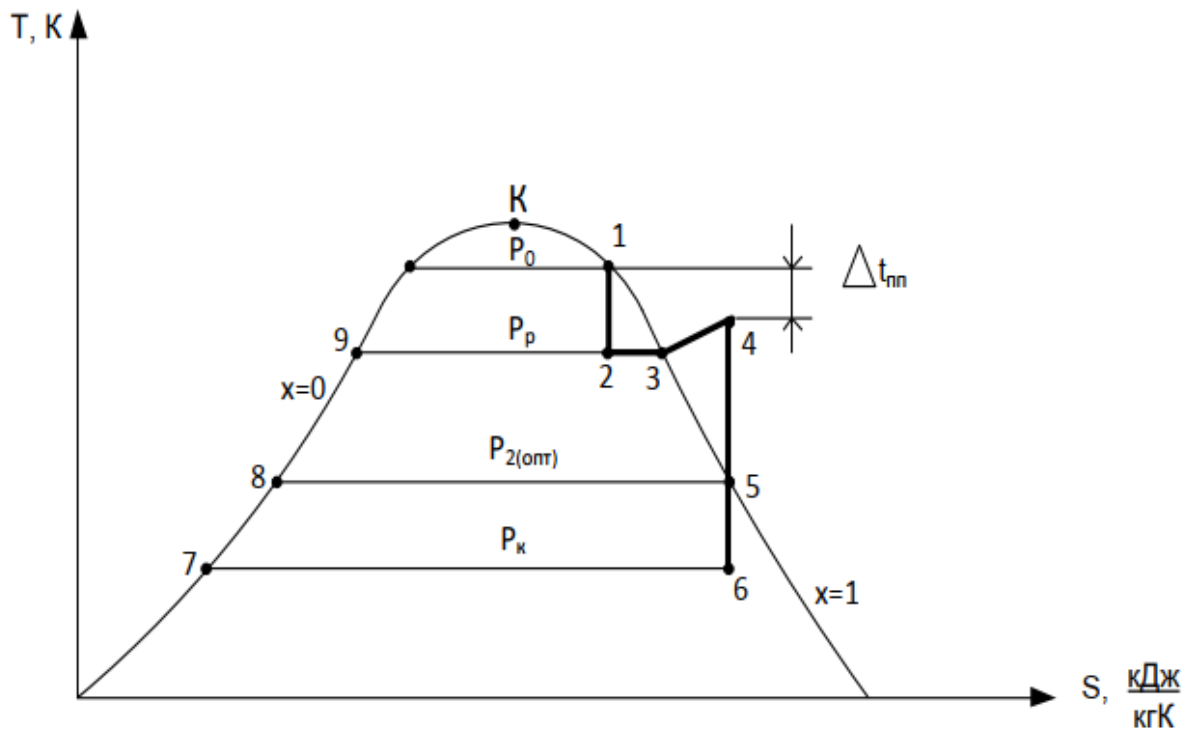


Рисунок 2 - Процесс расширения пара в турбоустановке АЭС в T-s диаграмме

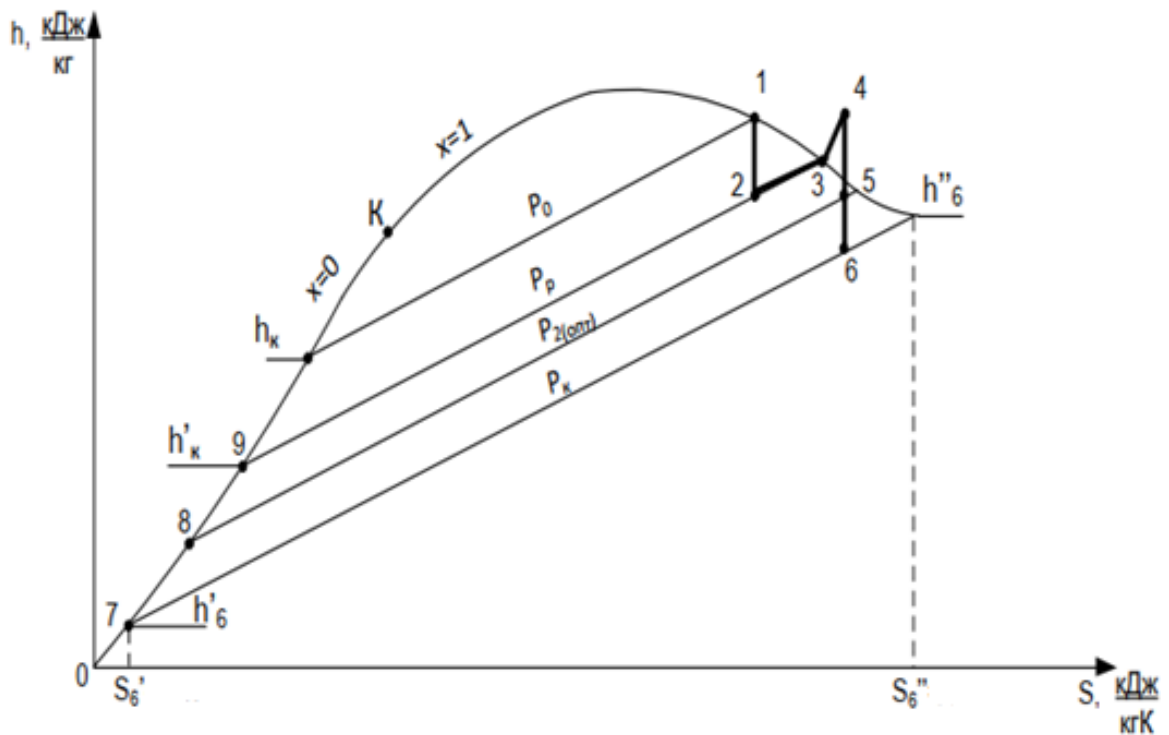


Рисунок 3 - Процесс расширения пара в турбоустановке АЭС в h-s диаграмме

Параметры в характерных точках процесса расширения пара в турбине и регенеративной схеме турбоустановки:

Точка 1

$$h_1 = f(P_0, x_0) = 2772,6 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

$$S_1 = f(P_0, x_0) = 5,8148 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} * \text{К}}$$

$$t_1 = f(P_0, x_0) = 558,98 \text{ К}$$

Точка 2

$$h_2 = f(P_p, S_2)$$

$$S_2 = S_1$$

$$S'_2 = f(P_p) = 2,0656 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} * \text{К}}$$

$$S''_2 = f(P_p) = 6,6449 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} * \text{К}}$$

$$x_2 = \frac{S_2 - S'_2}{S''_2 - S'_2} = 0,819$$

$$h'_2 = f(P_p) = 729,78 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

$$h''_2 = f(P_p) = 2770,3 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

$$h_2 = [h'_2 + x_2 * (h''_2 - h'_2)]_{P_p} = 2400,4 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Точка 3

$$h_3 = f(P_p, x_3 = x_c) = 2770,3 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Точка 4

$$t_4 = t_1 - \Delta t_{\text{пт}} = 538,98 \text{ К}$$

$$P_4 = P_p$$

$$h_4 = f(P_4, t_4) = 2983,1 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

$$S_4 = f(P_4, t_4) = 7,0797 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} * \text{К}}$$

Точка 5

$$P_5 = P_{2(\text{опт})} = 0,15 * P_p = 0,126 \text{ МПа}$$

$$S_5 = S_4$$

Определим, в какой области находится точка 5: в области перегретого или влажного пара, для этого, пользуясь таблицами теплофизических свойств воды и водяного пара, определим энтальпию пара h_5 .

$$h_5 = f(P_{2(\text{опт})}, S_5)$$

откуда следует, что точка 5 находится в области влажного пара.

$$S'_5 = f(P_5) = 1,3767 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} * \text{К}}$$

$$S''_5 = f(P_5) = 7,2813 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} * \text{К}}$$

$$x_5 = \frac{S_5 - S'_5}{S''_5 - S'_5} = 0,9659$$

$$h_5 = [h'_5 + x_5 * (h''_5 - h'_5)]_{P_{2(\text{опт})}} = 2608,7 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Точка 6

Конец процесса расширения пара в турбине находится в точке 6, в области влажного пара. Между точками 4 и 6 имеем адиабатный процесс расширения пара в турбине, при этом

$$S_6 = S_4$$

$$P_6 = P_k$$

$$S'_6 = f(P_6) = 0,4762 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} * \text{К}}$$

$$S''_6 = f(P_6) = 8,3938 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} * \text{К}}$$

$$x_2 = \frac{S_1 - S'}{S'' - S'} = 0,819$$

$$h'_6 = f(P_6)$$

$$h''_6 = f(P_6)$$

Степень сухости пара в конце процесса расширения

$$x_6 = \frac{S_6 - S'_6}{S''_6 - S'_6} = 0,834$$

$$h_6 = h_k = [h'_6 + x_6 * (h''_6 - h'_6)]_{P_k} = 2158,6 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Точка 7

Конденсат выходит из конденсатора турбины в точке 7:

$$P_7 = P_6 = P_k$$

$$h_7 = h'_7 = h'_6 = f(P_7) = 137,75 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Точка 8

Энтальпия конденсата на выходе из смешивающего подогревателя П2 соответствует энтальпии насыщения при давлении греющего пара P2(опт):

$$h_8 = h'_8 = h'_5 = f(P_{2(\text{опт})}) = 445,33 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Точка 9

Точка 9 представляет собой точку выхода дренажа из подогревателя П1. Энтальпия конденсата в точке 9 соответствует энтальпии насыщения при разделительном давлении P_p :

$$h_9 = h'_3 = h'_9 = f(P_p) = 729,78 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Сепаратор

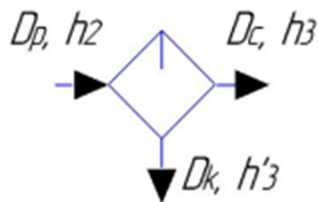


Рисунок 4 - Балансовая схема сепаратора

Уравнение теплового баланса сепаратора имеет вид:

$$D_p * h_2 = D_c * h_3 + D_k * h'_3 \quad (2.1)$$

$$D_c = D_p * \frac{x_2}{x_c} = 0,8187 * D_p$$

$$D_k = D_p - D_c = 0,1813 * D_p$$

Пароперегреватель

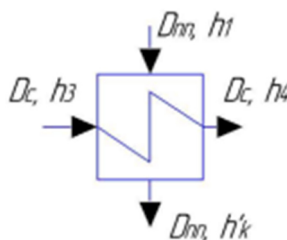


Рисунок 5 - Балансовая схема пароперегревателя

Уравнение теплового баланса пароперегревателя имеет вид:

$$D_c * (h_4 - h_3) = D_{np} * (h_1 - h'_k) \quad (2.2)$$

$$h'_k = f(P_1) = 1267,7 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Регенеративный подогреватель П2

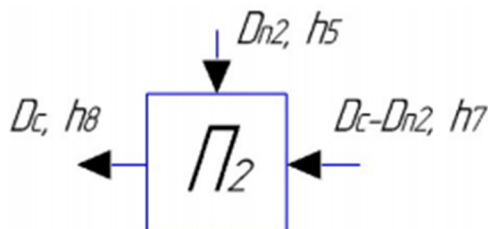


Рисунок 6 - Балансовая схема регенеративного подогревателя П2

Уравнение теплового баланса регенеративного подогревателя П2 имеет вид:

$$D_{п2} * h_5 + (D_c - D_{п2}) * h_7 = D_c * h_8 \quad (2.3)$$

где

$$D_{\text{к.чнд}} = D_c - D_{п2}; \quad D_{\text{к.чнд}} + D_{п2} = D_c - D_{п2} + D_{п2} = D_c$$

Регенеративный подогреватель П1

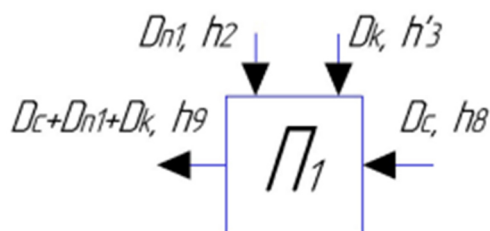


Рисунок 7 - Балансовая схема регенеративного подогревателя П1

Уравнение теплового баланса регенеративного подогревателя П1 имеет вид:

$$(D_c + D_{п1} + D_k) * h_9 = D_c * h_8 + D_{п1} * h_2 + D_k * h'_3 \quad (2.4)$$

Точка 1

Расходы пара на турбину $D_{\text{чнд}}$ и паро-паровой перегреватель $D_{\text{пп}}$ в сумме дают расход пара D из парогенератора в количестве 500 кг/с (см. рис. 8)

$$D = D_{\text{пп}} + D_{\text{чнд}} = D_{\text{пп}} + D_{\text{п1}} + D_{\text{р}} = 500 \text{ кг/с} \quad (2.5)$$

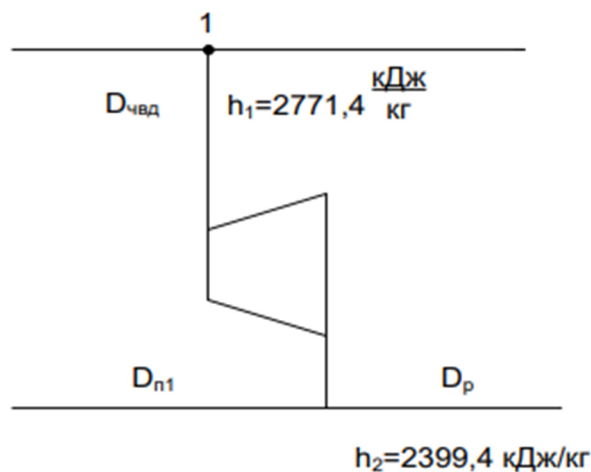


Рисунок 8 - Балансовая схема ЦВД турбины

Для определения $D_{\text{пп}}$ необходимо совместно решить материально-тепловые балансовые уравнения для сепаратора (2.1):

$$D_{\text{р}} * h_2 = D_{\text{с}} * h_3 + D_{\text{к}} * h'_3$$

и найдем

$$D_{\text{к}} = 0,1813 * D_{\text{р}}.$$

Для пароперегревателя (2.2) из уравнения:

$$D_{\text{с}} * (h_4 - h_3) = D_{\text{пп}} * (h_1 - h'_{\text{к}})$$

выразим $D_{\text{с}}$ и получим

$$D_{\text{пп}} = 0,1158 * D_{\text{р}} \\ D_{\text{с}} = D_{\text{пп}} * (h_1 - h'_{\text{к}}) / (h_4 - h_3) = 0,8189 * D_{\text{р}}$$

Подставим найденные значения в выражение (2.4) и тогда:

$$D_{п1} = 0,1394 * D_p$$

Рассмотрим уравнение материального баланса (2.5) и подставим в него найденные значения $D_{пп}$, $D_{п1}$, D_p :

$$D_{пп} + D_{п1} + D_p = 0,1158 * D_p + 0,1394 * D_p + D_p = 500$$

В результате найдем

$$D_p = 398,34 \text{ кг/с}$$

$$D_{п1} = 55,53 \text{ кг/с}$$

$$D_k = 72,22 \text{ кг/с}$$

$$D_{пп} = 46,13 \text{ кг/с}$$

$$D_c = 326,20 \text{ кг/с}$$

$$D_{п2} = 40,60 \text{ кг/с.}$$

где D - расход пара, поступающего из парогенератора в машинный зал;
 $D_{чвд}$ - расход пара, поступающего в ЧВД турбины;
 $D_{п1}$ - расход пара, поступающего в смешивающий подогреватель П1;
 D_p - расход пара, идущего из ЧВД и поступающего в сепаратор;
 D_k - расход дренажа, идущего из сепаратора в подогреватель П1;
 $D_{пп}$ - расход пара, поступающего в пароперегреватель СПП;
 $D_{чнд} = D.c$ - расход пара, поступающего в ЧНД турбины из сепаратора;
 $D_{п2}$ - расход пара, идущего в подогреватель П2;
 $D_{к.чнд}$ - расход пара, поступающего в конденсатор турбины.

Расход пара в конденсатор турбины

$$D_{к.чнд} = 285,6 \text{ кг/с}$$

Расход питательной воды на входе в парогенератор для идеальной схемы равен выходу пара из парогенератора, т.е.

$$D_{пв} = D = 500 \text{ кг/с}$$

Проверим правильность выполнения расчетов $D_{пв}$ по балансу для схемы регенерации

$$D'_{пв} = D_{к.чнд} + D_{п2} + D_k + D_{п1} + D_{пп} = 500,08 \text{ кг/с}$$

Погрешность расчёта

$$\delta = \frac{D_{\text{пв}} - D'_{\text{пв}}}{D_{\text{пв}}} = 0,016 \%$$

подтверждает, что точность расчёта достаточно высока.

Определим энтальпию питательной воды, как энтальпию после точки смешения двух потоков конденсата

$$D_{\text{пв}} * h_{\text{пв}} = (D_{\text{к.чнд}} + D_{\text{п2}} + D_{\text{к}} + D_{\text{п1}}) * h_9 + D_{\text{пп}} * h'_k$$

$$h_{\text{пв}} = 779,5 \text{ кДж/кг}$$

$$D_{\text{чвд}} = D - D_{\text{пп}} = 453,87 \text{ кг/с}$$

Найдем термический КПД цикла

$$\eta_t = \frac{W_0}{Q_3}$$

где W_0 – работа, совершаемая паром в идеальном цикле;

$$W_0 = D_{\text{чвд}} * (h_1 - h_2) + D_{\text{п2}} * (h_4 - h_5) + D_{\text{чвд}} * (h_4 - h_6) = 558360 \text{ кВт}$$

Q_3 – количестве теплоты, идущей на выработку электроэнергии в машинный зал АЭС

$$Q_3 = D_{\text{пв}} * (h_1 - h_{\text{пв}}) = 996540 \text{ кВт}$$

В результате термический КПД цикла

$$\eta_t = 0,56.$$

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Орлов, Г.Г. Тепловые и атомные электрические станции: учеб.-метод. пособие / Г.Г. Орлов, М.Ю. Зорин; под ред. Н.С. Работаевой; Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2015. – 72 с.
2. Орлов, Г.Г. Расчет термодинамических циклов ТЭС: учеб.-метод. пособие / Г.Г. Орлов, М.Ю. Зорин; под ред. А.В. Мошкарина; Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2010. – 37 с.
3. mini-REFPROP - Version 10.0 - NIST. – Электрон. дан. – Режим доступа: <https://trc.nist.gov/refprop/MINIREF/MINIREF.HTM>
4. SMath Studio - SMath. – Электрон. дан. – Режим доступа: <https://ru.smath.com/>
5. Mathcad: математическое ПО для инженерных расчетов | Mathcad. – Электрон. дан. – Режим доступа: <https://www.mathcad.com/>

СОДЕРЖАНИЕ

1	Методика проектирования	3
1.1	Техническое задание.....	3
1.2	Задание на курсовой проект.....	3
2	Методика расчета	3
2.1	Исходные данные.....	3
2.2	Методические указания.....	4
2.3	Решение.....	4
	Библиографический список.....	15

ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

по выполнению курсового проекта для обучающихся по направлению
14.03.01 «Ядерная энергетика и теплофизика» профиль «Техника и
физика низких температур» очной формы обучения

Составители:

Королев Константин Геннадьевич

Отпечатано в авторской редакции

Подписано к изданию 00.00.0000.

Объем данных 225 Кб

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

394026 Воронеж, Московский просп., 14

ФГБОУ ВО
«Воронежский государственный технический
университет»

СПРАВОЧНИК МАГНИТНОГО ДИСКА

(Кафедра физики твердого тела)

**ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ
АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ**

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
по выполнению курсового проекта для обучающихся по
направлению 14.03.01 «Ядерная энергетика и теплофизика»
профиль «Техника и физика низких температур» очной формы
обучения

Составители: К.Г. Королев

МУ КП ОПОАЭС.pdf 225 Кб 00.00.0000 0,0 уч.-изд.л
(наименование файла) (объем файла) (дата) (объем издания)