

М.И.Баженов
А.С.Богородский

СБОРНИК ЗАДАЧ ПО КУРСУ „ПРОМЫШЛЕННЫЕ ТЕПЛОВЫЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ„

Допущено Государственным комитетом СССР
по народному образованию в качестве
учебного пособия для студентов
теплоэнергетических специальностей вузов



МОСКВА ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ 1990

ББК 31.37
Б16
УДК 621.311.22(075.8)

Рецензенты: Б. С. Тупов и кафедра промышленной
теплоэнергетики
Уральского политехнического института

Баженов М. И., Богородский А. С.

Б16 Сборник задач по курсу «Промышленные тепловые электростанции»: Учеб. пособие для вузов.— М.: Энергоатомиздат, 1990.— 128 с.: ил.

ISBN 5-283-00144-X

Рассмотрены методы расчета и анализа принципиальных тепловых схем энергетических установок, установок теплоснабжения, технико-экономических показателей промышленных ТЭС. В каждой главе приведены основные теоретические сведения, формулы и справочные материалы, необходимые для решения задач. Часть задач снабжена решениями, остальные задачи — ответами. Большое внимание уделено утилизации вторичных энергоресурсов промышленных предприятий и защите окружающей среды.

Для студентов технических вузов, а также инженерно-технических работников — специалистов по промышленной энергетике.

Б 2203070000-511
051(01)-90 167-90

ББК 31.37

Учебное пособие

Баженов Михаил Иванович, Богородский Александр Сергеевич
СБОРНИК ЗАДАЧ ПО КУРСУ «ПРОМЫШЛЕННЫЕ
ТЕПЛОВЫЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ»

Заведующий редакцией *И. В. Волобуева*

Редактор *Н. М. Пеунова*

Художественный редактор *В. А. Гозак-Хозак*

Технический редактор *Н. В. Чиранова*

Корректор *З. Б. Драновская*

ИБ № 1832

Сдано в набор 25.12.89. Подписано в печать 22.05.90. Формат 60×88¹/₁₆
Бумага офсетная № 2 Гарнитура литературная Печать офсетная Усл.
печ. л. 7,84. Усл. кр.-отт. 8,08 Уч.-изд. л. 9,14 Тираж 5600 экз.
Заказ 3622 Цена 30 к.

Энергоатомиздат. 113114 Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10

Ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени
МПО «Первая Образцовая типография» Государственного комитета
СССР по печати. 113054, Москва, Валовая, 28

ISBN 5-283-00144-X

© Авторы, 1990

ПРЕДИСЛОВИЕ

Последнее издание задачника, наиболее близкое к курсу «Промышленные тепловые электростанции» (автор проф. В. В. Лукницкий), вышло в свет в 1956 г. За истекшее время в энергетике страны, в том числе и в промышленной теплоэнергетике, произошли огромные изменения. Появились новые высокоэкономичные теплофикационные турбины, возросли начальные параметры пара на ТЭС, произошло коренное обновление парка энергетического оборудования. В настоящее время на ТЭЦ работают теплофикационные установки единичной мощностью 250, 180, 100 МВт с начальными параметрами 13 и 24 МПа и 540—565° С.

Существенные изменения произошли в топливно-энергетическом балансе страны. Большое внимание в настоящее время уделяется эффективному использованию вторичных энергетических ресурсов промышленности и комплексному использованию органического топлива.

Современные тенденции развития промышленной теплоэнергетики в определенной мере отражены в учебнике «Промышленные тепловые электростанции» под общей редакцией проф. Е. Я. Соколова, второе издание которого вышло в 1979 г.

Предлагаемый задачник может служить учебным пособием для студентов энергетических вузов и факультетов при освоении ими базовой дисциплины. Поскольку задачник составлен на основе учебника «Промышленные тепловые электростанции», в нем до минимума сокращена теоретическая часть и при необходимости дается ссылка на литературные источники; вместе с тем многие задачи приводятся с подробными решениями; для однотипных задач даются только ответы. Авторы старались сохранить обозначения, использованные в названном учебнике.

Большое внимание в задачнике уделено вопросам экономической эффективности комбинированного производства теплоты и электроэнергии на ТЭЦ, анализу и расчету тепловых схем промышленных ТЭС, методике выбора основного оборудования для различных районов теплоэнергоснабжения.

Поскольку все более возрастает актуальность охраны окружающей среды и рационального использования природных ресурсов, авторы сочли необходимым главу задачника, посвященную этому вопросу, расширить и дополнить задачами по оценке ущерба, наносимого природной среде вредными выбросами промышленных предприятий. С этой целью в приложении дается необходимый справочный материал.

Ряд задач по определению расхода пара в турбине при заданных конкретных условиях их работы решается с помощью диаграммы переменных режимов турбины, которая также приводится в задачнике.

Главы 1 (кроме задачи 1.11), 3, 5 и 6 написаны М. И. Баженовым, гл. 2, 4, 7 и задача 1.11—А. С. Богородским, им же составлены приложения (кроме диаграммы режимов турбины Т-100-130).

Авторы вполне допускают, что первое издание нового задачника не будет свободно от недостатков как по охвату материала, так и по содержанию самих задач. Авторы с благодарностью примут и учтут в последующей работе все замечания и предложения по совершенствованию материала задачника. Замечания следует направлять по адресу: 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10, Энергоатомиздат.

Авторы

Глава первая

ПРИНЦИПИАЛЬНЫЕ ТЕПЛОВЫЕ СХЕМЫ

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК И МЕТОДЫ ИХ РАСЧЕТА

Задача 1.1. Определить расход пара и термический КПД паротурбинной электростанции мощностью $N_э = 12$ МВт с начальными параметрами пара $p_0 = 3,5$ МПа; $t_0 = 435^\circ\text{C}$; давление в конденсаторе $p_k = 5$ кПа; внутренний относительный КПД турбины $\eta_{oi} = 0,82$; электромеханический КПД $\eta_{эм} = 0,92$.

Решение. Расход пара в паровой турбине связан с мощностью [10]

$$N_э = D(h_0 - h_{кс}) \eta_{oi} \eta_{эм}, \quad (1.1)$$

где $N_э$ — электрическая мощность турбогенератора, кВт; D — расход пара на турбину при работе без отборов, кг/с; h_0 , $h_{кс}$ — энтальпия пара соответственно в начальной точке (перед турбиной) и в конце изэнтропного расширения (в конденсаторе), кДж/кг.

По заданным начальным и конечным параметрам p_0 , t_0 , p_k можно определить значения h_0 и $h_{кс}$ либо аналитически с помощью термодинамических функций, либо по таблицам и диаграммам водяного пара. Последний метод для решения простых прикладных задач требует меньших затрат времени. При решении задачи применен метод с использованием таблиц и диаграмм [11]. На рис. 1.1 показан процесс расширения пара в h, s -диаграмме водяного пара. Точку 0 находят в поле диаграммы на пересечении начальной изобары p_0 и начальной изотермы t_0 (заданы в условиях задачи). В точке 0 определяют начальную энтальпию $h_0 = 3303$ кДж/кг и энтропию $s_0 = 6,9589$ кДж/кг. От точки 0 строят изэнтропный процесс расширения пара в проточной части турбины ($s_0 = \text{const}$) до пересечения с конечной изобарой p_k . В точке пересечения определяют $h_{ki} = 2124$ кДж/кг — энтальпию пара в конце расширения. На рис. 1.1 так же показан действительный процесс расширения пара с учетом потерь, характеризуемых КПД η_{oi} . Для построения действительного процесса находят конечную энтальпию

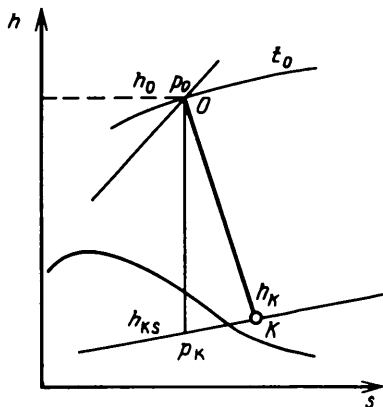
$$h_k = h_0 - (h_0 - h_{кс}) \eta_{oi} = 3303 - (3303 - 2124) \cdot 0,82 = 2336 \text{ кДж/кг.}$$

На пересечении изобары p_k и энтальпии h_k находят конечную точку процесса K и соединяют ее с начальной точкой 0. Зная энтальпию h_0 , $h_{кс}$, по заданной мощности $N_э$ находят расход пара на турбогенератор, используя формулу (1.1):

$$D = \frac{N_э}{(h_0 - h_{кс}) \eta_{oi} \eta_{эм}} = \frac{12 \cdot 10^3}{(3303 - 2124) \cdot 0,82 \cdot 0,92} = 13,49 \text{ кг/с.}$$

Для определения термического КПД цикла без учета работы питательного насоса необходимо определить энтальпию конденсата

Рис. 1.1. Процесс расширения пара в турбине в h, s -диаграмме



на выходе из конденсатора паровой турбины h'_k . Если считать, что конденсат в конденсаторе не переохлаждается, то значение энтальпии жидкости $h'_k = h_k$ находят по давлению в конденсаторе p_k , пользуясь таблицами свойств водяного пара [11]: при $p_k = 5$ КПа $h'_k = 137,8$ кДж/кг. Термический КПД цикла Ренкина

$$\eta_t = \frac{h_0 - h_{ks}}{h_0 - h'_k} = \frac{3303 - 2124}{3303 - 137,8} = 0,372.$$

Задача 1.2. Как изменится расход пара на турбину (см. предыдущую задачу), если будет применен регенеративный подогрев питательной воды паром из отбора турбины $p_{от6} = 0,1$ МПа в смешивающем подогревателе до температуры $t_{п.в} = 100^\circ \text{C}$? Определить также, как изменится термический КПД цикла с введением регенеративного подогрева.

Решение. Расход пара на турбину с отбором при той же электрической мощности $N_s = 12$ МВт = idem находится по формуле проф. В. И. Гриневецкого [10]:

$$D_T = D + y D_{от6} = \frac{N_s}{(h_0 - h_{ks}) \eta_{oi} \eta_{эм}} + \frac{h_{от6} - h_k}{h_0 - h_k} D_{от6}, \quad (1.2)$$

где $y = (h_{от6} - h_k) / (h_0 - h_k)$ — коэффициент недовыработки мощности паром турбины; $D_{от6}$ — расход пара из отбора турбины на регенеративный подогрев конденсата.

Отбор $D_{от6}$ обычно выражают в долях расхода пара на турбину $D_{от6} = \alpha D_T$, где α — доля отбора для смешивающего подогревателя. Эта доля определяется по тепловому балансу подогревателя и составляет

$$\alpha = (h'_{п.в} - h'_k) / (h_{от6} - h'_k).$$

Подставляя в (1.2) выражение для $D_{от6}$, находим

$$D_T = D + y D_{от6} = D + y \alpha D_T;$$

$$D_T = D / (1 - \alpha y).$$

Таким образом, расход пара на турбину с отбором находят через ранее известное значение расхода пара на турбину D и значения α и y .

Для определения y находят энтальпию пара в отборе $h_{от6}$ и конечную энтальпию пара h_k , пользуясь таким же методом построения процесса расширения пара, как и в задаче 1.1: $h_{от6} = 2653$ кДж/кг; $h_k = 2336$ кДж/кг. Определяют значения α и y по приведенным выше формулам, предварительно находя по таблицам воды и водяного пара $h'_{п.в} = 413$ кДж/кг и $h'_k = 137,7$ кДж/кг ($t_{п.в} = 100^\circ \text{C}$ и $t_k = 32,9^\circ \text{C}$):

$$\alpha = \frac{h'_{п.в} - h'_к}{h_{от6} - h'_к} = \frac{413 - 137,7}{2653 - 137,7} = 0,109;$$

$$y = \frac{h_{от6} - h_к}{h_0 - h_к} = \frac{2653 - 2336}{3303 - 2336} = 0,328.$$

По известным значениям α , y , D далее находят

$$D_T = \frac{D}{1 - \alpha y} = \frac{13,49}{1 - 0,109 \cdot 0,328} = 13,99 \text{ кг/с};$$

$$D_{от6} = \alpha D_T = 0,109 \cdot 13,99 = 1,53 \text{ кг/с}.$$

Проверка правильности решения:

$$D_T = D + y D_{от6} = 13,49 + 0,328 \cdot 1,53 = 13,99 \text{ кг/с}.$$

Термический КПД цикла с регенерацией

$$\eta_T^p = \frac{(h_0 - h_{кs})(1 - \alpha y)}{h_0 - h'_{п.в}} = \frac{(3303 - 2124)(1 - 0,109 \cdot 0,328)}{3303 - 413} = 0,393.$$

Относительный прирост КПД

$$\Delta \eta_T = \frac{\eta_T^p - \eta_T}{\eta_T} \cdot 100 = \frac{0,393 - 0,372}{0,372} \cdot 100 = 5,6\%.$$

Задача 1.3. Определить расход пара и термический КПД паротурбинной установки с параметрами пара перед турбиной $p_0 = 13$ МПа; $t_0 = 550^\circ \text{C}$; давление пара за турбиной $p_k = 6,0$ кПа; $\eta_{oi} = 0,79$; $\eta_{зм} = 0,93$; $N_s = 40$ МВт. Турбина работает с выключенной регенерацией.

Ответ: $D_T = 48,6$ кг/с; $\eta_T = 43\%$.

Задача 1.4. Определить расход пара и термический КПД паротурбинной установки с параметрами $p_0 = 4$ МПа; $t_0 = 450^\circ \text{C}$; $p_k = 4$ кПа с регенеративным подогревом конденсата в трех смешивающих подогревателях (рис. 1.2) до температуры питательной воды $t_{п.в} = 150^\circ \text{C}$; $\eta_{oi} = 0,85$; $\eta_{зм} = 0,93$; $N_s = 25$ МВт.

Решение. Задача решается таким же методом, что и задача 1.2. Предварительно определяют параметры и расходы отборов пара на регенерацию D_1 , D_2 , D_3 в долях общего расхода пара на турбину D_T :

$$D_1 = \alpha_1 D_T; D_2 = \alpha_2 D_T; D_3 = \alpha_3 D_T.$$

Параметры отборов p_1 , p_2 , p_3 и h_1 , h_2 и h_3 определяют построением процесса расширения пара в h , s -диаграмме. Давления в отборах определяют по температурам насыщения в смешивающих подогревателях при заданном равномерном распределении подогрева по ступеням. Интервал регенеративного подогрева определяют заданной $t_{п.в} = 150^\circ \text{C}$ и $t_k = 28,6^\circ \text{C}$ при $p_k = 4$ кПа. Интервал подогрева $\Delta t = t_{п.в} - t_k = 150 - 28,6 = 121,4^\circ \text{C}$. На ступень подогрева будет приходить

$$\Delta t_{ст} = \frac{\Delta t}{3} = \frac{121,4}{3} = 40,5^\circ \text{C}.$$

Температура насыщения третьего регенеративного отбора

$$t_{3н} = t_k + \Delta t_{ст} = 28,6 + 40,5 = 69,1^\circ \text{C}.$$

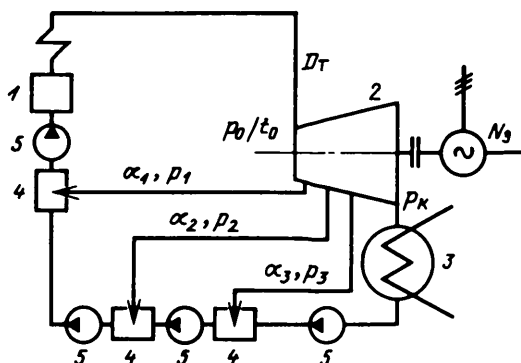


Рис. 1.2. Принципиальная схема паротурбинной установки с тремя регенеративными смешивающими подогревателями:

1 — котел; 2 — турбогенератор; 3 — конденсатор; 4 — регенеративный смешивающий подогреватель; 5 — насосы

По таблицам при найденной температуре $t_{1н} = 69,1^\circ \text{C}$ давление в третьем отборе составит $p_1 = 30 \text{ кПа}$. Аналогично находят $t_{2н}$ и p_2 ; $t_{3н}$ и p_3 :

$$t_{2н} = t_k + \Delta t_{ct} + \Delta t_{ct} = 28,6 + 40,5 + 40,5 = 109,6^\circ \text{C};$$

$$p_2 = 0,142 \text{ МПа};$$

$$t_{1н} = t_k + 3\Delta t_{ct} = t_{2н} + \Delta t_{ct} = 109,6 + 40,5 = 150,1^\circ \text{C}.$$

Так как $t_{п.н} = 150$, подогрев в последней ступени следует принять равным 40,4. Тогда $t_{1н} = t_{п.н} = 109,6 + 40,4 = 150^\circ \text{C}$ и $p_1 = 0,475 \text{ МПа}$.

По процессу расширения пара в h, s -диаграмме с учетом η_{oi} находят $h_0 = 3332 \text{ кДж/кг}$; $h_k = 2281 \text{ кДж/кг}$; $h_3 = 2508 \text{ кДж/кг}$; $h_2 = 2718 \text{ кДж/кг}$; $h_1 = 2908 \text{ кДж/кг}$. Затем по тем же формулам, что и в решении задачи 1.2, находят $\alpha_1, y_1, \alpha_2, y_2, \alpha_3, y_3$:

$$\alpha_3 = \frac{h'_{1н} - h'_k}{h_1 - h'_{1н}} = \frac{289,3 - 119,6}{2508 - 289,3} = 0,0765,$$

где

$$h_{1н} = c_p t_{1н} = 4,19 \cdot 69,1 = 289,3 \text{ кДж/кг};$$

$$h'_k = c_p t_k = 4,19 \cdot 28,6 = 119,6 \text{ кДж/кг};$$

$$y_3 = \frac{h_1 - h_k}{h_0 - h_k} = \frac{2508 - 2281}{3332 - 2281} = 0,216;$$

$$\alpha_2 = \frac{h'_{2н} - h'_{1н}}{h_2 - h'_{2н}} = \frac{458 - 289,3}{2718 - 458} = 0,0747,$$

где $h'_{2н} = c_p t_{2н} = 4,19 \cdot 109,6 = 458 \text{ кДж/кг}$;

$$y_2 = \frac{h_2 - h_k}{h_0 - h_k} = \frac{2718 - 2281}{3332 - 2281} = 0,406;$$

$$\alpha_1 = \frac{h'_{3н} - h'_{2н}}{h_3 - h'_{3н}} = \frac{628 - 458}{2908 - 628} = 0,0746,$$

где $h'_{1н} = c_p t_{1н} = 4,19 \cdot 150 = 628$ кДж/кг;

$$y_1 = \frac{h_3 - h_k}{h_0 - h_k} = \frac{2908 - 2281}{3332 - 2281} = 0,597.$$

Определяют расход пара на турбину с учетом регенеративных отборов:

$$D_T = \frac{N_3}{(h_0 - h_k) \eta_{эм} \left(1 - \sum_{i=1}^n \alpha_i y_i\right)} = \frac{25\,000}{(3332 - 2281) \cdot 0,93 \cdot (1 - 0,0765 \times \\ \rightarrow \times 0,216 - 0,0747 \cdot 0,406 - 0,0746 \cdot 0,597)} = 28,4 \text{ кг/с.}$$

Термический КПД цикла с регенерацией

$$\eta_i^p = \frac{(h_0 - h_{кз}) \left(1 - \sum_{i=1}^n \alpha_i y_i\right)}{h_0 - h_{н.в}} = \frac{(3332 - 2092) \cdot 0,908}{3332 - 628} = 0,416.$$

Термический КПД цикла без регенерации (для этих же параметров)

$$\eta_i^p = \frac{h_0 - h_{кз}}{h_0 - h'_k} = \frac{3332 - 2092}{3332 - 119,6} = 0,386.$$

Приращение КПД вследствие регенерации составит

$$\varepsilon = \frac{\eta_i^p - \eta_i}{\eta_i} = \frac{0,416 - 0,386}{0,386} = 0,0777 \text{ или } 7,77\%.$$

Задача 1.5. Определить расход пара на турбину К-12-35 при равномерном подогреве питательной воды в смешивающих подогревателях до температуры $t_{н.в} = 140^\circ \text{С}$. Начальные параметры пара $t_0 = 435^\circ \text{С}$, $p_0 = 3,5$ МПа; конечное давление $p_k = 5$ КПа; $\eta_{oi} = 0,82$; $\eta_{эм} = 0,95$. Количество регенеративных отборов $n = 4$.

Ответ: $D_T = 53,3$ т/ч.

Задача 1.6. Определить расход пара на турбину и увеличение термического КПД цикла при введении пятиступенчатого регенеративного подогрева питательной воды в турбине К-50-90. Начальные параметры пара $p_0 = 9$ МПа, $t_0 = 500^\circ \text{С}$; конечное давление $p_k = 5$ кПа; $\eta_{oi} = 0,86$; $\eta_{эм} = 0,97$; $t_{н.в} = 200^\circ \text{С}$; все подогреватели смешивающего типа; регенеративный подогрев по ступеням равномерный.

Ответ: $D_T = 197$ т/ч; $\varepsilon = \Delta \eta_i / \eta_i = 10\%$.

Задача 1.7. Решить предыдущую задачу при замене смешивающих подогревателей на поверхностные. Недогрев до температуры насыщения $\theta = t''_{отб} - t_{н.в} = 5^\circ \text{С}$. Слив конденсата греющего пара отборов — каскадный до конденсатора.

Ответ: $D_T = 195$ т/ч; $\varepsilon = \Delta \eta_i / \eta_i = 8,9\%$.

Задача 1.8. Определить абсолютный КПД газотурбинной установки (ГТУ), работающей по разомкнутому циклу при следующих условиях:

начальная температура газа перед турбиной $T_{н.т} = 1000$ К; температура воздуха перед компрессором $T_{в.к} = 290$ К; степень повышения давления в компрессоре $\varepsilon_k = \varepsilon_\tau = 9$; внутренний относительный КПД турбины $\eta_{oi} = 0,86$; адиабатный КПД компрессора $\eta_{ад} = 0,8$. Рабочее тело — воздух ($k = 1,4$).

Решение. Абсолютный КПД ГТУ

$$\eta_i^{ГТУ} = \frac{(\varepsilon^{\frac{k-1}{k}} - 1) \left(\frac{T_{н.т}}{T_{в.к}} \eta_{oi} \eta_{ад} \frac{1}{\varepsilon^{\frac{k-1}{k}}} - 1 \right)}{\left(\frac{T_{н.т}}{T_{в.к}} - 1 \right) \eta_{ад} - (\varepsilon^{\frac{k-1}{k}} - 1)} =$$

$$= \frac{(9^{\frac{1,4-1}{1,4}} - 1) \left(\frac{1000 \cdot 0,86 \cdot 0,8 \cdot 9^{-\left(\frac{1}{1,4-1}\right)}}{290} - 1 \right)}{\left(\frac{1000}{290} - 1 \right) \cdot 0,8 - (9^{\frac{1,4-1}{1,4}} - 1)} =$$

$$= \frac{0,873 \cdot 0,266}{1,085} = 0,214 = 21,4\%.$$

Задача 1.9. Для условий предыдущей задачи определить мощность ГТУ, если расход газов в турбине $G_r = 50$ кг/с, а расход воздуха в компрессоре $G_b = 48,5$ кг/с. Электромеханический КПД $\eta_{эм}^{ГТУ} = 0,98$.

Решение. Мощность ГТУ

$$N_3 = \frac{c_p T_{в.к} G_b}{\eta_{ад}} \left[(\varepsilon^{\frac{k-1}{k}} - 1) \left(\frac{T_{н.т}}{T_{в.к}} \frac{G_r}{G_b} \eta_{oi} \eta_{ад} \frac{1}{\varepsilon^{\frac{k-1}{k}}} - 1 \right) \right] \eta_{эм}^{ГТУ}.$$

Принимаем $c_p^b = c_p^r = 1$ кДж/(кг · К). Тогда

$$N_3 = \frac{1 \cdot 290 \cdot 48,5}{0,8} \left[(9^{0,286} - 1) \left(\frac{1000 \cdot 50 \cdot 0,86 \cdot 0,8}{290 \cdot 48,5 \cdot 9^{0,286}} - 1 \right) \right] \cdot 0,98 =$$

$$= 17581,25 \cdot 0,875 \cdot 0,305 \cdot 0,98 = 4598,15 \text{ кВт}.$$

Задача 1.10. Определить температуру газа за газовой турбиной, работающей с начальными параметрами: $p_{н.т} = 0,8$ МПа; $t_{н.т} = 750^\circ$ С. Давление на выходе турбины $p_{в.т} = 0,125$ МПа. Внутренний относительный КПД турбины $\eta_{oi} = 0,85$. Рабочее тело — воздух ($k = 1,4$).

Решение. Степень понижения давления в турбине $\varepsilon_\tau = p_{н.т}/p_{в.т} = 0,8/0,125 = 6,4$. В случае адиабатного расширения газа в турбине конечная температура на выходе

$$(T_{в.т})_a = T_{н.т} / \varepsilon_\tau^{\frac{k-1}{k}} = 273 + 750/6,4^{\frac{1,4-1}{1,4}} = 602 \text{ К}.$$

С учетом адиабатного КПД

$$T_{в.т} = T_{н.т} - (T_{н.т} - (T_{в.т})_a) \eta_{oi} = 1023 - (1023 - 602) \cdot 0,85 =$$

$$= 665,15 \text{ К} = 392^\circ \text{ С}.$$

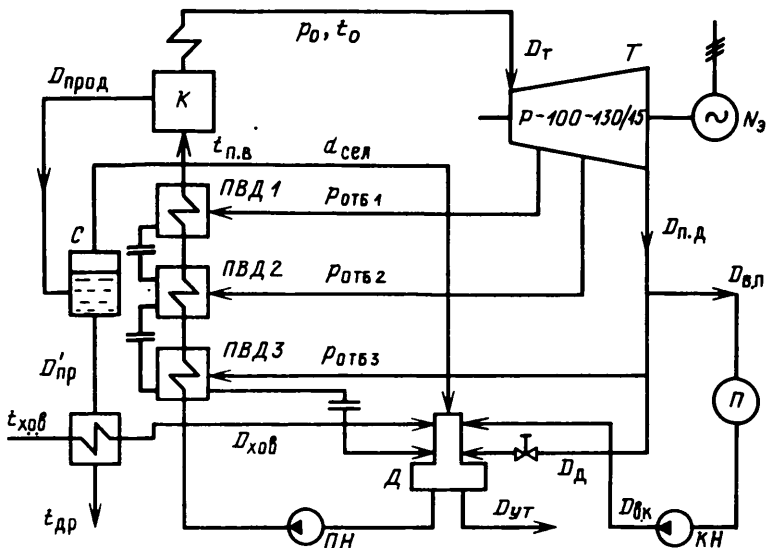


Рис. 1.3. Принципиальная тепловая схема турбоустановки Р-100-130/15:
 К—котел; Т—турбина; П—тепловой потребитель; Д—деаэратор; КН—конденсатный насос; ПН—питательный насос; ПВД—подогреватель высокого давления; С—сепаратор

Задача 1.11. Рассчитать принципиальную схему станции с турбиной Р-100-130/15 (ЛМЗ) при следующих исходных данных:
 начальные параметры пара перед турбиной $p_0 = 12,74$ МПа. $t_0 = 560^\circ \text{C}$;
 давление за турбиной $p_k = 1,0$ МПа;

отпуск пара внешнему потребителю из противодавления
 $D_{в.п} = 540$ т/ч;

внутренний относительный КПД турбины $\eta_{oi} = 0,844$;

электромеханический КПД турбогенератора $\eta_{эм} = 0,97$;

число отборов пара на регенерацию $n = 3$;

доля возвращаемого конденсата $\phi_{в.к} = 0,85$; $t_{в.к} = 70^\circ \text{C}$;

давление в деаэраторе $p_d = 0,588$ МПа;

температура химически очищенной воды $t_{х.о.в} = 30^\circ \text{C}$;

продувка котла $\alpha_{прод} = 1,0\%$ D_T ;

потеря пара и конденсата внутри станции $\alpha_{у.т} = 1,2\%$ D_T (условно принято из деаэратора);

продувочная вода котла после подогревателя химически очищенной воды сливается в канализацию с температурой $t_{сл} = 60^\circ \text{C}$.

Принципиальная схема турбоустановки представлена на рис. 1.3.

Решение. Расчет принципиальной схемы противодавленческой турбины сводится к определению расхода пара на турбину и развиваемой ею электрической мощности. При наличии нерегулируемых отборов пара для регенеративного подогрева питательной воды и возвращаемого конденсата с производства с не заданной наперед температурой питательной воды данная задача может быть решена лишь методом предварительной оценки расхода пара на турбину с последующим уточнением (методом последовательных приближений).

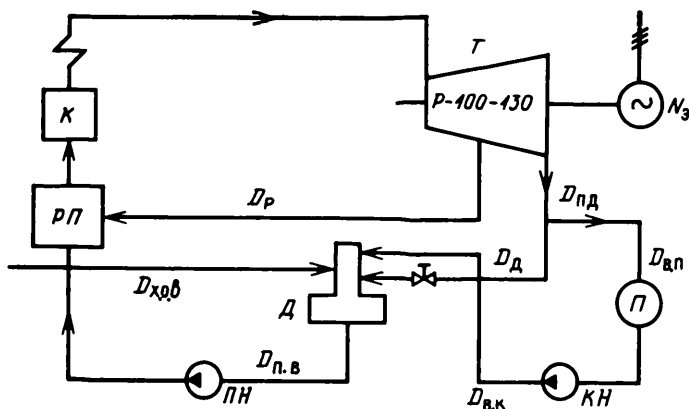


Рис. 1.4. К решению задачи 1.11:

РР — регенеративный подогреватель смешивающего типа

Для предварительной оценки расхода пара на турбину расчетную схему представим в ином виде, заменив регенеративную систему из трех поверхностных подогревателей одним условным смешивающим регенеративным подогревателем (рис. 1.4). В этом случае расход пара на турбину $D_T = D_{pd} + D_p$, где $D_{pd} = D_{в.п} + D_d$. Здесь $D_{в.п}$ — отпуск пара внешнему потребителю; D_d — расход пара на деаэратор; D_p — расход пара из отбора в условном смешивающем регенеративном подогревателе.

Строим рабочий процесс в турбине в h, s -диаграмме (рис. 1.5) и находим $h_k = 2930$ кДж/кг.

На основе материального и теплового балансов оцениваем расход пара на деаэратор:

$$D_d = \frac{D_{х.о.в}(h'_d - h'_{х.о.в}) + D_{в.к}(h'_d - h'_{в.к})}{h_k - h'_d},$$

где $D_{в.к}$ — расход возвращаемого конденсата, т/ч.

Расход химически очищенной воды

$$D_{х.о.в} = (1 - \phi_{в.к}) D_{в.п} + D_{yt} + D'_{прод}.$$

Оцениваем $D_{yt} + D'_{прод} \approx 15$ т/ч. Тогда

$$D_{х.о.в} = (1 - 0,85) \cdot 540 + 15 = 96 \text{ т/ч};$$

$$D_d = \frac{96(666,8 - 125,6) + 459(666,8 - 293)}{2930 - 666,8} = 98,77 \text{ т/ч}.$$

Предварительный расход пара из противодавления

$$D_{pd} = D_{в.п} + D_d = 540 + 98,77 = 638,77 \text{ т/ч}.$$

Задаемся температурой питательной воды $t_{п.в} = 230^\circ \text{C}$.

Определяем параметры среднего условного регенеративного отбора пара. Температура питательной воды в смешивающем регенеративном подогревателе

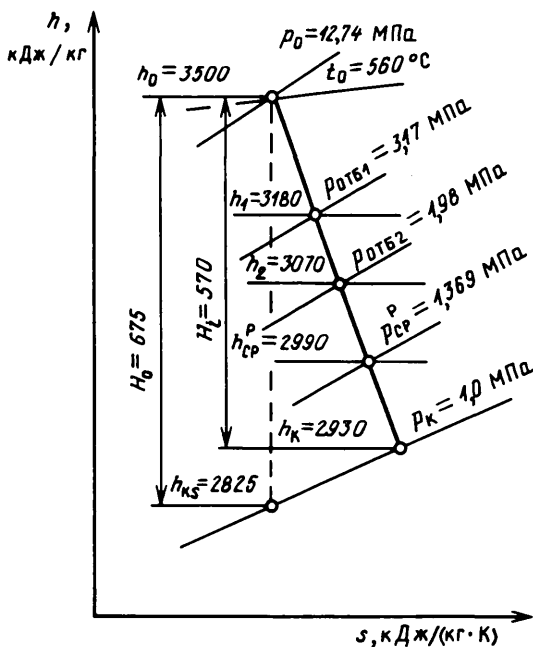


Рис. 1.5. Процесс расширения пара в турбине Р-100-130/15 ЛМЗ в h, s -диаграмме

$$t_p^{cp} = \frac{t_{п.в} + t_d}{2} = \frac{230 + 158}{2} = 194^\circ \text{C}.$$

Давление в среднем регенеративном отборе

$$p_p^{cp} = f(t_p^{cp}) = 1,369 \text{ МПа}.$$

По h, s -диаграмме находим $h_p^{cp} = 2990 \text{ кДж/кг}$.

Определяем расход пара в условном регенеративном подогревателе. Уравнение теплового баланса

$D_p^{cp} (h_p^{cp} - h'_{п.в}) \eta_{т.а} = [D_{п.д} + D_{yt} + D_{прод}] (h'_{п.в} - h'_d)$, где $\eta_{т.а} = 0,98$ — КПД теплообменного аппарата; отсюда

$$\begin{aligned} D_p^{cp} &= \frac{(D_{п.д} + D_{yt} + D_{прод}) (h'_{п.в} - h'_d)}{(h_p^{cp} - h'_{п.в}) \eta_{т.а}} = \\ &= \frac{(638,77 + 15)(990,3 - 666,8)}{(2990 - 990,3) 0,98} = 107,92 \text{ т/ч}. \end{aligned}$$

Предварительный расход пара на турбину

$$D_t = D_{пд} + D_p^{cp} = 638,77 + 107,92 = 746,69 \approx 746,7 \text{ т/ч}.$$

При номинальной нагрузке и при конечном давлении $p_k = 1,47 \text{ МПа}$ турбина Р-100-130 согласно заводским данным имеет следующую

характеристику: $D_T^0 = 760$ т/ч; давления и температуры в отборах $p_{от6}^0 = 3,4$ МПа; $t_{от61}^0 = 385^\circ \text{C}$; $p_{от62}^0 = 2,28$ МПа; $t_{от63}^0 = 335^\circ \text{C}$; $p_{от63}^0 = 1,47$ МПа; $t_{от63}^0 = 284^\circ \text{C}$.

Используя формулу Флюгеля, определяем давление в первом отборе при расходе пара на турбину $D_T = 746,7$ т/ч и конечном давлении $p_k = 1,0$ МПа:

$$p_{от61} = \sqrt{p_k^2 + \left(\frac{D_T}{D_T^0}\right)^2 [(p_{от61}^0)^2 - (p_k^0)^2]} = \\ = \sqrt{1,0^2 + \left(\frac{746,7}{760}\right)^2 (3,4^2 - 1,47^2)} = 3,17 \text{ МПа.}$$

На h, s -диаграмме находим $h_{от61} = 3180$ кДж/кг (см. рис. 1.5); $t_1'' = 236,9^\circ \text{C}$.

Принимаем недогрев $\theta = 4,9^\circ \text{C}$, тогда температура питательной воды на входе в котел $t_{п.в} = 232^\circ \text{C}$.

Расход питательной воды

$$D_{п.в} = D_T + D_{прод} = 1,01 D_T = 1,01 \cdot 746,7 = 754,167 \text{ т/ч.}$$

Расход продувочной воды $D_{прод} = 7,467$ т/ч.

Расчет сепаратора непрерывной продувки:

$$d_{сеп} = \frac{D_{прод}(h'_{прод} - h'_{сеп})}{h''_{сеп} - h'_{сеп}} \quad (\text{см. задачу 4.9}),$$

где $h'_{прод} = 1565$ кДж/кг (при $p_{к.у} = 13,8$ МПа); $h''_{сеп} = 2755,5$ кДж/кг; $h'_{сеп} = 666,8$ кДж/кг.

$$d_{сеп} = \frac{7,467(1565 - 666,8)}{2755,5 - 666,8} = 3,21 \text{ т/ч.}$$

Количество продувочной воды, сливаемой в дренаж, $D'_{прод} = D_{прод} - d_{сеп} = 7,467 - 3,21 = 4,257$ т/ч.

Температура добавочной химически очищенной воды после охладителя продувки

$$t_{доб} = t_{х.о.в} + \frac{D_{прод}}{D_{доб}}(t_{сеп} - t_{сл}) = 30 + \frac{4,257}{81 + 0,012 \cdot 746,7}(158 - 60) = 34,63^\circ \text{C.}$$

Определяем интервал подогрева питательной воды в регенеративных подогревателях

$$\Delta t_{п.в} = t_{п.в} - t_d = 232 - 158 = 74^\circ \text{C.}$$

При трехступенчатом равномерном подогреве питательной воды в каждой ступени

$$\Delta t_{ПВД} = 74 : 3 \approx 25^\circ \text{C.}$$

Температура питательной воды перед ПВД

$$t_1' = t_{п.в} - \Delta t_{ПВД} = 232 - 25 = 207^\circ \text{C.}$$

Расход пара на ПВД1

$$D_{отб1} = \frac{D_{п.в}(h'_{п.в} - h'_1)}{(h_{отб1} - h'_{отб1}) \eta_{т.а}} = \frac{754,167(999,7 - 884,1)}{(3180 - 1023) \cdot 0,98} = 41,24 \text{ т/ч.}$$

Температура насыщения пара второго отбора

$$t_{отб2}^н = t'_{ПВД1} + \theta = 207 + 5 = 212^\circ \text{ С; давление отбора } p_{отб2} = 1,985 \text{ МПа.}$$

Проверка давления в камере второго отбора по формуле Флюгеля

$$p_{отб2} = \sqrt{p_k^2 + \left(\frac{D'_{отс}}{D^0_{отс}}\right)^2 [(p_{отб2}^0)^2 - (p_k^0)^2]} =$$

$$= \sqrt{1,0^2 + \left(\frac{746,7 - 41,24}{760 - 41,24}\right)^2 (2,28^2 - 1,47^2)} = 1,981 \text{ МПа.}$$

С помощью h, s -диаграммы определяем энтальпию пара во втором отборе: $h_{отб2} = 3070 \text{ кДж/кг}$; $h'_{отб2} = 908 \text{ кДж/кг}$. Температура воды перед подогревателем ПВД2 $t'_2 = t_{отб3}^н - 0 = 180 - 4 = 176^\circ \text{ С}$.

Уравнение теплового баланса ПВД2

$$D_{п.в}(h'_1 - h'_2) = [D_{отб2}(h_{отб2} - h'_{отб2}) + D_{отб1}(h'_{отб1} - h'_{отб2})] \eta_{т.а}.$$

Отсюда

$$D_{отб2} = \frac{D_{п.в}(h'_1 - h'_2) - D_{отб1}(h'_{отб1} - h'_{отб2}) \eta_{т.а}}{(h_{отб2} - h'_{отб2}) \eta_{т.а}} =$$

$$= \frac{754,167(884,1 - 737) - 41,24(1023 - 908) \cdot 0,98}{(3070 - 908) \cdot 0,98} = 50,15 \text{ т/ч.}$$

Температура насыщения пара третьего отбора $t_{отб3}^н = 180^\circ \text{ С}$ ($p_{отб3} = 1,0 \text{ МПа}$). Энтальпия пара третьего отбора $h_{отб3} = 2930 \text{ кДж/кг}$; $h'_{отб3} = 764,2 \text{ кДж/кг}$.

Расход пара из третьего отбора

$$D_{отб3} = \frac{D_{п.в}(h'_2 - h'_{п.в}) - \eta_{т.о}[(D_{отб1} + D_{отб2})(h'_{отб2} - h'_{отб3})]}{(h_{отб3} - h'_{отб3}) \eta_{т.а}},$$

где $h'_{п.в} = h'_д + \Delta h_{п.н}$ — энтальпия питательной воды за питательным насосом;

$$\Delta h_{п.н} = \frac{\Delta p_{п.н} v_{ср}}{\eta_{п.н}} = \frac{(15,0 - 0,588) 10^6 \cdot 0,0013}{0,75 \cdot 10^3} \approx 25 \text{ кДж/кг};$$

$$h'_{п.в} = 666,8 + 25 = 692 \text{ кДж/кг.}$$

$$D_{отб3} = \frac{754,167(737 - 692) - 0,98(41,24 + 50,15)(908 - 764,2)}{(2930 - 764,2) \cdot 0,98} = 11,260 \text{ т/ч.}$$

Тепловой баланс деаэратора

$$D_d h_k \eta_d + d_{сеп} h''_{сеп} + (D_{отб1} + D_{отб2} + D_{отб3}) h'_{отб3} +$$

$$+ D_{в.к} h'_{в.к} + D_{доб} h'_{доб} = (D_{п.в} + D_{ут}) h'_д;$$

$$D_d = \frac{(D_{п.в} + D_{ут}) h'_d - \sum D_{отб}^{пвд} h'_{отб3} - d_{сеп} d''_{сеп} - D_{доб} h'_{доб} - D_{в.к} h'_{в.к}}{h_k \eta_d} =$$

$$= \frac{(754,167 + 8,96) 666,8 - 102,65 \cdot 764,2 - 3,21 \cdot 2755,5 - 89,96 \times}{2930 \cdot 0,98} \rightarrow$$

$$\rightarrow \frac{\times 145 - 459 \cdot 293}{2930 \cdot 0,98} = 95,57 \text{ т/ч.}$$

Полный расход пара в турбине

$$D_T = D_{отб1} + D_{отб2} + D_{отб3} + D_d + D_{в.п} = 41,24 + 50,15 +$$

$$+ 11,26 + 95,57 + 540 = 738,22 \text{ т/ч.}$$

По сравнению с первоначально принятым расходом пара расхождение составляет

$$\Delta D_T = \frac{746,7 - 738,22}{746,7} \cdot 100 = 1,1\%.$$

Дальнейшей корректировки расхода пара не делаем (расхождение допускается до 2%).

Электрическая мощность турбины

$$N_3 = \sum D_i \Delta h_i \eta_{эм} = [D_{отб1} \Delta h_1 + D_{отб2} \Delta h_2 + D_{отб3} \Delta h_3 + (D_d + D_{в.п}) H_i] \eta_{эм} =$$

$$= [41,24 \cdot 320 + 50,15 \cdot 430 + 11,26 \cdot 570 + (95,57 + 540) \cdot 570] \times$$

$$\times 0,97 \frac{1000}{3600} = 108,7 \text{ МВт.}$$

Перегрузка турбины вызвана завышенным расходом пара внешним потребителем при пониженном (против расчетного) противодавлении.

Глава вторая

КОМБИНИРОВАННАЯ ВЫРАБОТКА ТЕПЛОТЫ И ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ТЭЦ

Задача 2.1. Определить расход пара на турбину номинальной электрической мощностью $N_3 = 60$ МВт, отпускающей из отбора пар в количестве $D_{отб} = 120$ т/ч. Давление в отборе $p_n = 1,0$ МПа; начальные параметры пара перед турбиной $p_0 = 12,7$ МПа, $t_0 = 540^\circ \text{C}$. Давление в конденсаторе турбины $p_k = 4$ кПа. Средний внутренний относительный КПД турбины $\eta_{oi} = 0,85$; электромеханический КПД турбогенератора $\eta_{эм} = 0,98$.

Решение. Располагаемый теплоперепад пара на турбину из h , s -диаграммы водяного пара при изэнтропном процессе расширения пара в турбине равен $H_0 = 1460$ кДж/кг ($h_0 = 3440$ кДж/кг; $h_{ks} = 1980$ кДж/кг). С учетом внутреннего относительного КПД турбины

определяем действительную энтальпию пара в отборе $h_{отб} = 2962$ кДж/кг и энтальпию пара в конденсаторе $h_k = 2200$ кДж/кг.

Коэффициент недовыработки мощности отборным паром

$$y = \frac{h_{отб} - h_k}{h_0 - h_k} = \frac{2962 - 2200}{3440 - 2200} = 0,614;$$

$$D_T = \frac{N_s \cdot 3600}{H_0 \eta_{oi} \eta_{эм}} + y D_{отб} = \frac{N_s \cdot 3600}{H_i \eta_{эм}} + y D_{отб};$$

$$D_T = \frac{60 \cdot 10^3 \cdot 3600}{1460 \cdot 0,85 \cdot 0,98} + 0,614 \cdot 120 \cdot 10^3 = 251,28 \cdot 10^3 \text{ кг/ч} = 251,28 \text{ т/ч}.$$

Задача 2.2. Определить часовой перерасход пара и натурального топлива на ТЭЦ, если применительно к условиям задачи 2.1 отпуск пара внешнему потребителю будет осуществляться в том же количестве не из отбора турбины, а непосредственно из котла. КПД котельной установки $\eta_{к.у} = 0,89$; теплота сгорания рабочего топлива $Q_p = 10,30$ МДж/кг; энтальпия питательной воды $h'_{п.в} = 850$ кДж/кг.

Решение. Перерасход пара при переходе от комбинированного к раздельному способу производства электроэнергии на ТЭЦ в случае отпуска одного и того же количества пара определяется как разность в расходах пара из котла

$$\Delta D_k = D_k^{\text{разд}} - D_k^{\text{комб}} = D_T^{\text{конд}} + D_k^{\text{отб}} - (D_T^{\text{конд}} + y D_{отб}),$$

где $D_T^{\text{конд}}$ — конденсационный расход пара турбиной.

При равенстве $D_k^{\text{отб}}$ и $D_{отб}$ $\Delta D_k = (1 - y) D_{отб} = (1 - 0,614) \cdot 120 \cdot 10^3 = 46,32$ т/ч.

Перерасход натурального топлива

$$\Delta B = \frac{\Delta D_k (h_0 - h'_{п.в})}{Q_p \eta_{к.у}} = \frac{46,32 (3440 - 850)}{10,3 \cdot 10^3 \cdot 0,89} = 13,087 \text{ т/ч}.$$

Задача 2.3. Произвести сравнение расходов пара из котла в случаях комбинированного и раздельного способов производства электроэнергии при отпуске одного и того же количества электроэнергии и теплоты. Данные для расчетов принять те же, что и в задаче 2.1. Энтальпия полностью возвращаемого конденсата $h'_{в.к} = 293$ кДж/кг.

Решение. Расход пара из котла при раздельном способе производства одного и того же количества теплоты и электроэнергии на ТЭЦ будет больше, чем при комбинированном, на:

$$\Delta D_k = \left(\frac{h_{отб} - h'_{в.к}}{h_0 - h'_{в.к}} - y \right) D_{отб}.$$

Отношение $\frac{h_{отб} - h'_{в.к}}{h_0 - h'_{в.к}}$ показывает, во сколько раз расход пара из котла меньше расхода пара из отбора турбины для получения одного и того же количества теплоты, так как пар в котле имеет более высокий энтальпийный потенциал, чем отборный пар турбины:

$$\Delta D_k = \left(\frac{2962 - 293}{3440 - 293} - 0,614 \right) \cdot 120 \cdot 10^3 = 28,09 \cdot 10^3 \text{ кг/ч} = 28,09 \text{ т/ч}.$$

Задача 2.4. Определить удельную выработку электроэнергии на тепловом потреблении в теплофикационной турбине. Энтальпия пара перед турбиной $h_0 = 3300$ кДж/кг; энтальпия пара в отборе $h_{отб} = 2800$ кДж/кг; энтальпия полностью возвращаемого конденсата $h'_{в.к} = 500$ кДж/кг. Электромеханический КПД турбогенератора $\eta_{эм} = 0,98$.

Решение. Удельная выработка электроэнергии на тепловом потреблении $\bar{\varepsilon}_T$ определяется по формуле

$$\bar{\varepsilon}_T = \frac{\varepsilon_T}{Q_{отб}} = \frac{D_{отб}(h_0 - h_{отб})\eta_{эм}}{D_{отб}(h_{отб} - \varphi_{в.к}h'_{в.к})} = \frac{h_0 - h_{отб}}{h_{отб} - \varphi_{в.к}h'_{в.к}} \eta_{эм},$$

где ε_T — выработка электроэнергии отборным паром турбины, кВт·ч; $Q_{отб}$ — количество отпущенной с отборным паром теплоты, ГДж; $\varphi_{в.к}$ — доля возвращаемого конденсата.

Как следует из приведенной зависимости, удельная выработка электроэнергии на тепловом потреблении $\bar{\varepsilon}_T$ представлена в безразмерном виде. В размерном виде

$$\bar{\varepsilon}_T = 278 \frac{h_0 - h_{отб}}{h_{отб} - \varphi_{в.к}h'_{в.к}} \eta_{эм}, \text{ кВт} \cdot \text{ч} / \text{ГДж},$$

где $278 = \frac{10^6}{3600}$. В нашем примере (при $\varphi_{в.к} = 1$)

$$\bar{\varepsilon}_T = 278 \frac{3300 - 2800}{2800 - 500} \cdot 0,98 = 278 \cdot 0,2126 \approx 59 \text{ кВт} \cdot \text{ч} / \text{ГДж}.$$

Задача 2.5. Определить, как изменится удельная выработка электроэнергии на тепловом потреблении при повышении давления в отборе турбины с $p_{отб1} = 0,12$ МПа до $p_{отб2} = 0,25$ МПа. Начальные параметры пара перед турбиной: $p_0 = 13,0$ МПа, $t_0 = 565^\circ \text{C}$; давление в конденсаторе турбины $p_k = 0,007$ МПа; внутренний относительный КПД (средний для всей турбины) $\eta_{oi} = 0,85$; $\eta_{эм} = 0,97$. Энтальпия возвращаемого конденсата $h'_{в.к} = 300$ кДж/кг; $\varphi_{в.к} = 1$.

Ответ: Удельная выработка $\bar{\varepsilon}_T$ уменьшится на

$$\Delta \bar{\varepsilon}_T = (\bar{\varepsilon}_T)_{1,2} - (\bar{\varepsilon}_T)_{2,5} = 101,12 - 82,94 = 18,18 \text{ кВт} \cdot \text{ч} / \text{ГДж}.$$

Задача 2.6. Определить удельную выработку электроэнергии на тепловом потреблении турбины П-50-130, отпускающей из промышленного отбора пар в количестве $D_n = 60$ т/ч. Возврат конденсата на ТЭЦ $D_{в.к} = 50$ т/ч; температура возвращаемого конденсата $t_{в.к} = 75^\circ \text{C}$. Начальные параметры пара перед турбиной $p_0 = 13$ МПа, $t_0 = 540^\circ \text{C}$; давление в отборе $p_n = 1,2$ МПа; внутренний относительный КПД турбины $\eta_{oi} = 0,86$; электромеханический КПД турбогенератора $\eta_{эм} = 0,98$.

Ответ: $\bar{\varepsilon}_T = 55,74$ кВт·ч/ГДж.

Задача 2.7. Определить часовую теплофикационную выработку электроэнергии на ТЭЦ, отпускающей из отборов турбин пар в количестве 200 т/ч. Конденсат с производства возвращается полностью. Давление в отборах турбин $p_n = 1,2$ МПа. Начальные параметры пара перед турбинами: $p_0 = 13,0$ МПа, $t_0 = 560^\circ \text{C}$; средний внутренний относительный КПД турбин $\eta_{oi} = 0,86$; $\eta_{эм} = 0,97$.

Решение. Из построения процесса расширения пара в турбине на h, s -диаграмме находим $h_0 = 3500$ кДж/кг; $h_{отб} = 2943$ кДж/кг;

$$\begin{aligned}\mathcal{E}_\tau &= N_{\text{отб}} \tau = \frac{D_n(h_0 - h_{\text{отб}}) 10^3}{3600} \eta_{\text{эм}} \cdot 1 = \\ &= \frac{200(3500 - 2943)}{3600} \cdot 10^3 \cdot 0,97 = 30016 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.\end{aligned}$$

Задача 2.8. Определить часовую теплофикационную выработку электроэнергии на регенеративном подогреве возвращаемого с производства промышленного конденсата (на внутреннем теплоснабжении). Исходные данные: параметры пара перед турбиной $p_0 = 14$ МПа; $t_0 = 555^\circ \text{C}$; давление в конденсаторе $p_k = 5$ кПа; давление в отборе турбины $p_n = 1,5$ МПа. Количество отпускаемого из отбора пара $D_n = 85$ т/ч; количество возвращаемого конденсата на станцию $D_{\text{в.к}} = 70$ т/ч; температура возвращаемого конденсата $t_{\text{в.к}} = 76^\circ \text{C}$; температура питательной воды на ТЭЦ $t_{\text{п.в}} = 230^\circ \text{C}$, температура химически очищенной воды $t_{\text{х.о.в}} = 30^\circ \text{C}$; внутренний относительный КПД турбины (средний на турбину) $\eta_{\text{от}} = 0,84$; электромеханический КПД турбогенератора $\eta_{\text{эм}} = 0,97$.

Решение. Теплофикационная выработка электроэнергии на базе регенеративного подогрева возвращаемого с производства конденсата определяется по формуле $\mathcal{E}_\tau = \bar{\mathcal{E}}_\tau Q_p$, где $\bar{\mathcal{E}}_\tau = \frac{h_0 - h_p^{\text{сп}}}{h_p^{\text{сп}} - h'_{\text{п.в}}} \eta_{\text{эм}}$ — удельная

выработка электроэнергии паром условного (среднего) регенеративного отбора; h_0 и $h_p^{\text{сп}}$ — энтальпии пара соответственно перед турбиной и в условном (среднем) регенеративном отборе; $h'_{\text{п.в}}$ — энтальпия питательной воды; Q_p — количество теплоты, пошедшей на регенеративный подогрев возвращаемого конденсата. Если конденсат не полностью возвращается на станцию, то $Q_p = D_n(h'_{\text{п.в}} - h'_{\text{к.с}})$, где $h'_{\text{к.с}} = \varphi_{\text{в.к}} h'_{\text{в.к}} + (1 - \varphi_{\text{в.к}}) h'_{\text{х.о.в}}$ — энтальпия смеси промышленного конденсата и химически очищенной воды; $\varphi_{\text{в.к}} = D_{\text{в.к}} / D_n = 70/85 = 0,823$.

Таким образом, $\mathcal{E}_\tau = \frac{h_0 - h_p^{\text{сп}}}{h_p^{\text{сп}} - h'_{\text{п.в}}} \eta_{\text{эм}} \frac{D_n}{3600} 10^3 (h'_{\text{п.в}} - h'_{\text{к.с}}) \tau$, где $\tau = 1$ ч.

Строго говоря, теплофикационная выработка электроэнергии на базе регенеративного подогрева должна определяться как сумма теплофикационных выработок электроэнергии каждым регенеративным отбором всей системы регенеративного подогрева конденсата. Здесь применили согласно [10] искусственный, но вполне приемлемый для инженерных расчетов метод, приняв, что регенеративный подогрев конденсата осуществляется до температуры питательной воды в одном смешивающем подогревателе паром условного (среднего) регенеративного отбора.

Для нахождения $h_p^{\text{сп}}$ поступают следующим образом: находят $h'_{\text{к.с}} = 4,19 [\varphi_{\text{в.к}} t_{\text{в.к}} + (1 - \varphi_{\text{в.к}}) t_{\text{х.о.в}}] = 4,19 [0,823 \cdot 76 + 0,177 \cdot 30] = 306,5$ кДж/кг.

Определяют среднюю температуру регенеративного подогрева конденсата

$$t_p^{\text{сп}} = \frac{t_{\text{п.в}} + t_{\text{к.с}}}{2} = \frac{230 + 306,5/4,19}{2} = 151,6^\circ \text{C}.$$

По $t_p^{\text{сп}} = 151,6^\circ \text{C}$ с помощью таблиц воды и водяного пара определяют давление насыщения пара $p_p^{\text{сп}} = 0,495$ МПа.

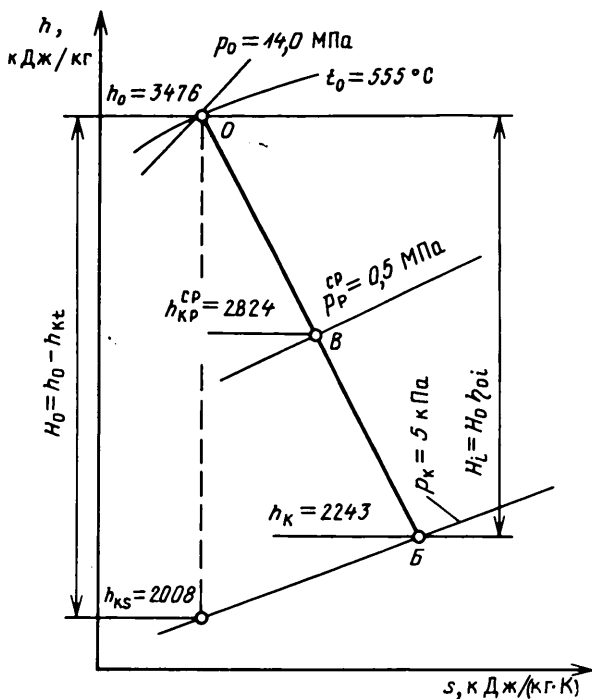


Рис. 2.1. Процесс расширения пара в турбине в h , s -диаграмме (к определению h_{BP})

Далее строят процесс расширения пара в турбине от начальной точки (p_0, t_0) до давления в конденсаторе p_K в координатах h, s (рис. 2.1), из которого следует: $h_0 = 3476$ кДж/кг; $h_{\text{BP}} = 2824$ кДж/кг (точка B пересечения линии OB с изобарой p_{BP}).

Подставляем в формулу найденные значения и определяем

$$\mathcal{E}_T = \frac{3476 - 2824}{2824 - 990} \cdot 0,97 \cdot \frac{85 \cdot 10^3}{3600} (990 - 306,5) = 5565,1 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Задача 2.9. Определить суточную теплофикационную выработку электроэнергии на внешнем теплоснабжении (без учета регенеративного подогрева возвращаемого конденсата) в турбине ПТ-135/165-130/13. Количество отпускаемой теплоты из отопительного отбора $Q_T = 290$ ГДж/ч, а из промышленного отбора $D_n = 150$ т/ч пара. Доля возвращаемого конденсата с производства $\phi_{\text{в.к}} = 0,8$; температура возвращаемого конденсата $t_{\text{в.к}} = 70^\circ \text{C}$. Конденсат пара теплофикационного отбора не теряется и не переохлаждается. Начальные параметры пара $p_0 = 13,0$ МПа; $t_0 = 560^\circ \text{C}$. Давление в промышленном отборе $p_n = 1,3$ МПа; давление в теплофикационном отборе $p_T = 0,18$ МПа. Внутренний относительный КПД турбины $\eta_{\text{от}}^{\text{ср}} = 0,85$; $\eta_{\text{мх}} = 0,97$.

Ответ: $\mathcal{E}_T = 749\,310$ кВт·ч/сут.

Задача 2.10. Применительно к условиям задачи 2.9 определить суточную теплофикационную выработку электроэнергии в турбине

ПТ-135/165-130/13 с учетом регенеративного подогрева конденсата сетевых подогревателей и возвращаемого с производства конденсата. Температура питательной воды котлов $t_{п.в} = 230^\circ \text{C}$; температура химически очищенной воды $t_{х.о.в} = 30^\circ \text{C}$.

Решение. Учет влияния регенеративного подогрева возвращаемого конденсата на удельную выработку электроэнергии на тепловом потреблении ведется с помощью коэффициента e_p [1]: $\bar{s}_r = \bar{s}_{в.п} (1 + e_p)$, где $\bar{s}_{в.п}$ — удельная теплофикационная выработка на внешнем теплопотреблении, определяемая как $\bar{s}_{в.п} = 278 \frac{h_0 - h_{отб}}{h_{отб} - \varphi_{в.к} h'_{в.к}}$ (см. ре-

шение задачи 2.4); $e_p = \frac{h_0 - h_p^{cp}}{h_0 - h_{отб}} \frac{h'_{п.в} - h'_{к.с}}{h_p^{cp} - h'_{п.в}}$; здесь h_0 — энтальпия пара перед турбиной; $h_{отб}$ — энтальпия пара в регулируемом отборе; h_p^{cp} — энтальпия пара условного (среднего) отбора для регенеративного подогрева возвращаемого конденсата; $h'_{п.в}$ и $h'_{к.с}$ — энтальпии соответственно питательной воды и смеси конденсата и химически очищенной воды.

Для теплофикационного отбора $h'_{к.с} = h'_{отб.т}$, так как конденсат сетевых подогревателей не переохлаждается и возвращается полностью. Температура насыщения пара теплофикационного отбора $t'_{отб.т} = 116,9^\circ \text{C}$; $h'_{отб.т} = 490,7 \text{ кДж/кг}$ ($p_t = 0,18 \text{ МПа}$).

Средняя температура регенеративного подогрева конденсата сетевых подогревателей $t_{p_t}^{cp} = \frac{t_{п.в} + t_{к.с}}{2} = \frac{230 + 116,9}{2} = 173,5^\circ \text{C}$. Этой температуре соответствует давление насыщения пара условного (среднего) отбора для регенеративного подогрева конденсата сетевых подогревателей $p_{p_t}^{cp} = 0,86 \text{ МПа}$ (по таблицам).

Температура и энтальпия смеси возвращаемого промышленного конденсата и химически очищенной воды

$$t_{к.с} = (1 - \varphi_{в.к}) t_{х.о.в} + \varphi_{в.к} t_{в.к} = (1 - 0,8) \cdot 30 + 0,8 \cdot 70 = 62^\circ \text{C};$$

$$h'_{к.с} = 259 \text{ кДж/кг}.$$

Средняя температура регенеративного подогрева возвращаемого промышленного конденсата $t_{p_n}^{cp} = \frac{t_{п.в} + t_{к.с}}{2} = \frac{230 + 62}{2} = 146^\circ \text{C}$. Этой температуре соответствует давление насыщения пара условного (среднего) отбора для регенеративного подогрева возвращаемого промышленного конденсата $p_{p_n}^{cp} = 0,422 \text{ МПа}$.

Далее строим процесс расширения пара в турбине в h', s -диаграмме (рис. 2.2), из которого находим:

$$h_0 = 3500 \text{ кДж/кг}; \quad h_{отб.п} = 3022 \text{ кДж/кг}; \quad h_{отб.т} = 2711 \text{ кДж/кг};$$

$$h_p^{cp} = 2832 \text{ кДж/кг}; \quad h_{p_n}^{cp} = 2948 \text{ кДж/кг}.$$

Находим значения удельных выработок электроэнергии на внешнем теплопотреблении для отборов П и Т:

$$(\bar{s}_{в.п})_п = 278 \frac{h_0 - h_{отб.п}}{h_{отб.п} - \varphi_{в.к} h'_{в.к}} \eta_{эм} =$$

$$= 278 \frac{3500 - 3022}{3022 - 0,8 \cdot 293} \cdot 0,97 = 46,24 \text{ кВт} \cdot \text{ч/ГДж};$$

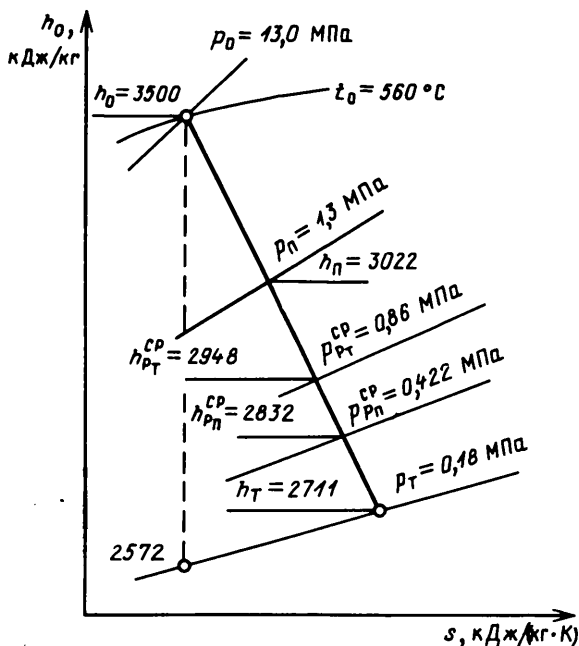


Рис. 2.2. К определению значений h_{pn}^{cp} и h_{pT}^{cp}

$$\begin{aligned}
 (\bar{s}_{в.п})_T &= 278 \frac{h_0 - h_{отб.т}}{h_{отб.т} - h'_{отб.т}} \eta_{зм} = \\
 &= 278 \frac{3500 - 2711}{2711 - 490,7} \cdot 0,97 = 95,8 \text{ кВт} \cdot \text{ч/ГДж}.
 \end{aligned}$$

Определяем e_{pn} и e_{pT} :

$$\begin{aligned}
 e_{pn} &= \frac{h_0 - h_{pn}^{cp}}{h_0 - h_{отб.п}} \frac{h'_{п.в} - h_{к.с}}{h_{pn}^{cp} - h'_{п.в}} = \frac{3500 - 2832}{3500 - 3022} \cdot \frac{964,0 - 259}{2832 - 964} = 0,527; \\
 e_{pT} &= \frac{h_0 - h_{pT}^{cp}}{h_0 - h_{отб.т}} \frac{h'_{п.в} - h_{отб.т}}{h_{pT}^{cp} - h'_{п.в}} = \frac{3500 - 2948}{3500 - 2711} \cdot \frac{964 - 490,7}{2948 - 964} = 0,341.
 \end{aligned}$$

Количество отпускаемой теплоты с паром промышленного отбора

$$Q_n = D_n (h_{отб.п} - \varphi_{в.к} h'_{в.к}) = 150 \cdot 10^3 (3022 - 0,8 \cdot 293) = 418,1 \text{ ГДж/ч}.$$

Полная суточная теплофикационная выработка электроэнергии турбиной ПТ-135/160-130/13

$$\begin{aligned}
 \mathcal{E}_T &= [(\bar{s}_{в.п})_n (1 + e_{pn}) Q_n + (\bar{s}_{в.п})_T (1 + e_{pT}) Q_T] \tau = \\
 &= [46,24 (1 + 0,527) \cdot 418,1 + 95,8 (1 + 0,341) \cdot 290] \cdot 24 = \\
 &= [29521,4 + 37255,6] \cdot 24 \approx 1,60 \cdot 10^6 \text{ кВт} \cdot \text{ч/сут}.
 \end{aligned}$$

Таким образом, за счет внутреннего теплоснабжения теплофикационная выработка электроэнергии более чем удвоилась ($1,6 \cdot 10^6$ против $0,749 \cdot 10^6$ кВт·ч/сут).

Задача 2.11. Определить средний удельный расход условного топлива на ТЭЦ по выработке электроэнергии без учета внутреннего теплоснабжения, если 2/3 ее производится на отборном паре, отпускаемом внешнему потребителю. КПД конденсационного цикла $\eta_{\text{конд}}=0,32$; $\eta_{\text{к.у}}=0,91$; $\eta_{\text{зм}}=0,98$; КПД теплового потока (КПД трубопроводов) $\eta_{\text{т.п}}=0,99$; $Q_p^* = 29\,330$ кДж/кг.

Решение. Средний удельный расход условного топлива

$$b_{\text{ТЭЦ}}^{\text{сп}} = \frac{B_{\text{ТЭЦ}}}{\mathcal{E}_{\text{ТЭЦ}}} = \frac{b_{\text{ТЭЦ}}^{\text{т.п}} 2/3 \mathcal{E}_{\text{ТЭЦ}} + b_{\text{ТЭЦ}}^{\text{к.у}} 1/3 \mathcal{E}_{\text{ТЭЦ}}}{\mathcal{E}_{\text{ТЭЦ}}} = 2/3 b_{\text{ТЭЦ}}^{\text{т.п}} + 1/3 b_{\text{ТЭЦ}}^{\text{к.у}},$$

где $b_{\text{ТЭЦ}}^{\text{т.п}}$ и $b_{\text{ТЭЦ}}^{\text{к.у}}$ — удельные расходы условного топлива на выработанный 1 кВт·ч электроэнергии отборным паром и конденсационным потоком пара:

$$b_{\text{ТЭЦ}}^{\text{т.п}} = \frac{0,123}{\eta_{\text{к.у}} \eta_{\text{зм}} \eta_{\text{т.п}}} = \frac{0,123}{0,91 \cdot 0,98 \cdot 0,99} = 0,139 \text{ кг/(кВт·ч)};$$

$$b_{\text{ТЭЦ}}^{\text{к.у}} = 0,123 / \eta_{\text{конд}} = 0,123 / 0,32 = 0,384 \text{ кг/(кВт·ч)};$$

$$b_{\text{ТЭЦ}}^{\text{сп}} = 2/3 \cdot 0,139 + 1/3 \cdot 0,384 = 0,220 \text{ кг/(кВт·ч)}.$$

Задача 2.12. На ТЭЦ с двумя турбинами Т-100-130 максимальный часовой отпуск теплоты из отопительных отборов $Q_{\text{т}} = 1300$ ГДж/ч. Среднее давление в отопительных отборах $p_{\text{т}}^{\text{сп}} = 0,17$ МПа. Время использования максимума отопительной нагрузки $\tau_{\text{т}} = 2200$ ч, а установленной мощности турбин $\tau_{\text{у}} = 6300$ ч. Начальные параметры пара $p_0 = 13,0$ МПа; $t_0 = 560^\circ \text{C}$; давление в конденсаторе $p_{\text{к}} = 5,0$ кПа. Определить годовую конденсационную выработку электроэнергии на ТЭЦ с учетом регенеративного подогрева конденсата сетевых подогревателей и основного конденсата турбин, если температура питательной воды котлов $t_{\text{п.в}} = 230^\circ \text{C}$; $\eta_{\text{т}}^{\text{сп}} = 0,83$; $\eta_{\text{зм}} = 0,98$.

Решение. Установленная мощность ТЭЦ $N_{\text{у}} = 2N_{\text{т}} = 2 \cdot 100 = 200$ МВт. Годовая выработка электроэнергии на ТЭЦ $\mathcal{E}_{\text{ТЭЦ}}^{\text{год}} = N_{\text{у}} \tau_{\text{у}} = 200 \cdot 10^3 \cdot 6300 = 1260 \cdot 10^6$ кВт·ч/год. Годовой отпуск теплоты с ТЭЦ $Q_{\text{т}}^{\text{год}} = Q_{\text{т}} \tau_{\text{т}} = 1300 \cdot 2200 = 2,86 \cdot 10^6$ ГДж/год.

Теплофикационная выработка электроэнергии отборным паром с учетом регенеративного подогрева конденсата сетевых подогревателей (конденсат не теряется)

$$(\mathcal{E}_{\text{т}}^{\text{год}})_{\text{отб}} = Q_{\text{т}}^{\text{год}} \bar{\varepsilon}_{\text{в.п}} (1 + e_{\text{п}}) \quad (\text{см. решение задачи 2.10});$$

$$t_{\text{п.т}}^{\text{сп}} = \frac{t_{\text{п.в}} + t_{\text{отб}}^{\text{н}}}{2} = \frac{230 + 115}{2} = 172,5^\circ \text{C}; \quad p_{\text{п.т}}^{\text{сп}} = 0,85 \text{ МПа};$$

$$\bar{\varepsilon}_{\text{в.п}} = 278 \frac{h_0 - h_{\text{отб.т}}}{h_{\text{отб.т}} - h'_{\text{отб.т}}} \eta_{\text{зм}}; \quad e_{\text{п}} = \frac{h_0 - h_{\text{п.т}}^{\text{сп}}}{h_0 - h_{\text{отб.т}}} \times \\ \times \frac{h'_{\text{п.в}} - h'_{\text{отб.т}}}{h_{\text{п.т}}^{\text{сп}} - h'_{\text{п.в}}}.$$

На основе построения процесса расширения пара в турбине на h , s -диаграмме находим:

$$h_0 = 3500 \text{ кДж/кг}; h_{\text{отб.т}} = 2662 \text{ кДж/кг}; h_{\text{р.т}}^{\text{ср}} = 2924 \text{ кДж/кг}.$$

Энтальпия конденсата сетевых подогревателей $h'_{\text{отб.т}} = 483 \text{ кДж/кг}$; энтальпия питательной воды $h'_{\text{п.в}} = 964 \text{ кДж/кг}$. Получаем:

$$\bar{s}_{\text{п.в}} = 278 \frac{3500 - 2662}{2662 - 483} \cdot 0,98 = 104,77 \text{ кВт} \cdot \text{ч/ГДж};$$

$$e_{\text{р.т}} = \frac{3500 - 2924}{3500 - 2662} \cdot \frac{964 - 483}{2924 - 964} = 0,687 \cdot 0,245 = 0,168;$$

$$(\mathcal{E}_{\text{т}}^{\text{год}})_{\text{отб}} = 2,86 \cdot 10^6 \cdot (1 + 0,168) \cdot 104,77 \approx 350 \cdot 10^6 \text{ кВт} \cdot \text{ч/год}.$$

Конденсационная выработка электроэнергии на станции за год без учета регенеративного подогрева основного конденсата турбин

$$(\mathcal{E}_{\text{конд}}^{\text{год}})^{6/p} = \mathcal{E}_{\text{тЭЦ}}^{\text{год}} - (\mathcal{E}_{\text{т}}^{\text{год}})_{\text{отб}} = 1260 \cdot 10^6 - 350 \cdot 10^6 = 910 \cdot 10^6 \text{ кВт} \cdot \text{ч/год}.$$

Годовая комбинированная выработка электроэнергии на базе регенеративного подогрева основного конденсата турбины определяется с помощью коэффициента $e_{\text{р.т}}(\mathcal{E}_{\text{т}}^{\text{год}})_{\text{конд}} = e_{\text{р.т}}(\mathcal{E}_{\text{конд}}^{\text{год}})^{6/p}$, где $e_{\text{р.т}} = \frac{h_0 - h_{\text{р.т}}^{\text{ср}}}{h_0 - h_{\text{к}}} \cdot \frac{h'_{\text{п.в}} - h'_{\text{к}}}{h_{\text{р.т}}^{\text{ср}} - h'_{\text{п.в}}}$; $h_{\text{р.т}}^{\text{ср}}$ — энтальпия пара условного (среднего) регенеративного отбора для подогрева конденсата турбины; $h_{\text{к}}$ — энтальпия пара в конденсаторе; $h'_{\text{к}}$ — энтальпия конденсата;

$$t_{\text{р.т}}^{\text{ср}} = \frac{t_{\text{п.в}} + t_{\text{к}}}{2} = \frac{230 + 32,9}{2} = 131,5^\circ \text{ C};$$

$$p_{\text{р.т}}^{\text{ср}} = 0,28 \text{ МПа}; h_{\text{р.т}}^{\text{ср}} = 2730 \text{ кДж/кг}; h_{\text{к}} = 2250 \text{ кДж/кг}; h'_{\text{к}} = 137,7 \text{ кДж/кг};$$

$$e_{\text{р.т}} = \frac{3500 - 2730}{3500 - 2250} \cdot \frac{964 - 137,7}{2730 - 964} = 0,616 \cdot 0,467 = 0,288;$$

$$(\mathcal{E}_{\text{т}}^{\text{год}})_{\text{конд}} = 0,288 \cdot 910 \cdot 10^6 = 262 \cdot 0,8 \cdot 10^6 \text{ кВт} \cdot \text{ч/год}.$$

Конденсационная выработка электроэнергии на ТЭЦ за год

$$(\mathcal{E}_{\text{конд}}^{\text{ТЭЦ}})^{\text{год}} = \mathcal{E}_{\text{ТЭЦ}}^{\text{год}} - [(\mathcal{E}_{\text{т}}^{\text{год}})_{\text{отб}} + (\mathcal{E}_{\text{т}}^{\text{год}})_{\text{конд}}] = \\ = 1260 \cdot 10^6 - 612,08 \cdot 10^6 \approx 648 \cdot 10^6 \text{ кВт} \cdot \text{ч/год}.$$

Задача 2.13. Применительно к условию задачи 2.12 определить абсолютные КПД и удельные расходы условного топлива по выработке электроэнергии по конденсационному и теплофикационному циклам. КПД котельной установки $\eta_{\text{к.у}} = 0,9$; $\eta_{\text{oi}} = 0,83$; $\eta_{\text{эм}} = 0,98$; $\eta_{\text{т.п}} = 0,99$; $Q_{\text{п}}^{\text{н}} = 29,33 \text{ МДж/кг}$.

Решение. Абсолютный КПД по выработке электроэнергии по конденсационному циклу $\eta_{\text{р.т}}^2 = \eta_{\text{к}}^2 \frac{1 + e_{\text{р.т}}}{1 + e_{\text{р.т}} \eta_{\text{к}}^2}$, где $\eta_{\text{к}}^2$ — абсолютный электрический КПД конденсационного цикла без регенеративного подогрева основного конденсата турбин:

$$\eta_{\kappa}^2 = \frac{H_i}{h_0 - h'_{\kappa}} \eta_{\kappa, y} \eta_{\text{зм}} \eta_{\text{т.п}} = \frac{3500 - 2250}{3500 - 137,7} \cdot 0,9 \cdot 0,98 \cdot 0,99 = 0,322;$$

$e_{p_{\kappa}}$ — относительная теплофикационная выработка электроэнергии на регенеративном подогреве основного конденсата турбин:

$$e_{p_{\kappa}} = \frac{H_{p_{\kappa}}}{H_{\kappa}} \frac{h'_{\text{п.в}} - h'_{\kappa}}{h_{p_{\kappa}} - h'_{\text{п.в}}} = \frac{3500 - 2730}{3500 - 2250} \cdot \frac{964 - 137,7}{2730 - 964} = 0,28;$$

$$\eta_{p_{\kappa}}^3 = 0,322 \cdot \frac{1 + 0,28}{1 + 0,28 \cdot 0,322} = 0,378.$$

Абсолютный КПД по выработке электроэнергии по теплофикационному циклу

$$\eta_{\text{т}}^2 = \eta_{\kappa, y} \eta_{\text{зм}} \eta_{\text{т.п}} = 0,9 \cdot 0,98 \cdot 0,99 = 0,873.$$

Удельный расход условного топлива по выработке электроэнергии конденсационным способом

$$b_{\kappa}^2 = \frac{0,123}{\eta_{p_{\kappa}}^3} = \frac{0,123}{0,378} = 0,325 \text{ кг/(кВт} \cdot \text{ч)}.$$

Удельный расход условного топлива по выработке электроэнергии на отборном паре

$$b_{\text{т}}^3 = \frac{0,123}{\eta_{\text{т}}^2} = \frac{0,123}{0,873} = 0,140 \text{ кг/(кВт} \cdot \text{ч)}.$$

Задача 2.14. По результатам решения задач 2.12 и 2.13 определить средний для ТЭЦ удельный расход натурального топлива по выработке электроэнергии, если теплота сгорания натурального топлива $Q_{\text{н}}^p = 17,59 \text{ МДж/кг}$.

Ответ: $b_{\text{ТЭЦ}}^3 = 0,392 \text{ кг/(кВт} \cdot \text{ч)}$.

Задача 2.15. Определить КПД конденсационной электростанции и удельный расход натурального топлива с учетом регенеративного подогрева основного конденсата турбин (с учетом внутреннего теплопотребления). Начальные параметры пара на КЭС $p_0 = 9,0 \text{ МПа}$; $t_0 = 550^\circ \text{С}$; давление в конденсаторах турбин $p_{\kappa} = 4,0 \text{ кПа}$. Температура питательной воды котлов $t_{\text{п.в}} = 220^\circ \text{С}$; внутренний относительный КПД турбин $\eta_{oi} = 0,84$; электромеханический КПД $\eta_{\text{зм}} = 0,97$; КПД котельной установки $\eta_{\kappa, y} = 0,9$; КПД трубопроводов $\eta_{\text{т.п}} = 0,98$. Теплота сгорания натурального топлива $Q_{\text{н}}^p = 20 \text{ МДж/кг}$.

Ответ: $\eta_{p_{\kappa}}^3 = 0,36$.

Задача 2.16. Определить часовую экономию условного топлива на ТЭЦ, если половина вырабатываемой ею электрической энергии производится на отборном паре. КПД конденсационного цикла $\eta_{\text{конд}} = 0,31$; $\eta_{\kappa, y} = 0,89$; $\eta_{\text{зм}} = 0,98$; $\eta_{\text{т.п}} = 0,99$. Номинальная электрическая мощность ТЭЦ $N_{\text{э}} = 180 \text{ МВт}$. Удельный расход условного топлива в энергосистеме $b_{\text{КЭС}} = 0,34 \text{ кг/(кВт} \cdot \text{ч)}$. Удельный расход условного топлива на выработку теплоты на ТЭЦ и районной котельной одинаков. Теплота сгорания топлива $Q_{\text{н}}^p = 29,33 \text{ МДж/кг}$.

Решение. Часовая конденсационная выработка электроэнергии равна часовой теплофикационной выработке электроэнергии $\mathcal{E}_{\text{ТЭЦ}}^{\text{т}} = \mathcal{E}_{\text{ТЭЦ}}^{\text{т}} = N_{\text{э}} \tau / 2 = 90 \cdot 10^3 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$ ($\tau = 1 \text{ ч}$).

Удельный конденсационный расход условного топлива на 1 кВт·ч вырабатываемой электроэнергии на ТЭЦ $b_{т.ц}^{з.к} = 0,123/\eta_{\text{конд}} = 0,123/0,31 = 0,397$ кг/(кВт·ч).

Удельный расход условного топлива на 1 кВт·ч, выработанный отборным паром,

$$b_{т.ц}^{з.т} = \frac{0,123}{\eta_{к.у} \eta_{з.м} \eta_{т.п}} = \frac{0,123}{0,89 \cdot 0,98 \cdot 0,99} = 0,142 \text{ кг/(кВт·ч);}$$

$$\begin{aligned} \Delta B_{з.к} &= \mathcal{E}_{т.ц}^{з.т} (b_{к.с} - b_{т.ц}^{з.т}) - \mathcal{E}_{т.ц}^{з.к} (b_{т.ц}^{з.к} - b_{к.с}) = \\ &= 90 \cdot 10^3 (0,34 - 0,142) - 90 \cdot 10^3 (0,397 - 0,34) = \\ &= 17,82 \cdot 10^3 - 5,13 \cdot 10^3 = 12,69 \text{ т/ч.} \end{aligned}$$

Эту же задачу можно решить другим способом:

$\Delta B_{з.к} = \mathcal{E}_{т.ц} (b_{к.с} - b_{т.ц}^{з.т})$, где $b_{т.ц}^{з.т}$ — средний удельный расход условного топлива по выработке электроэнергии на ТЭЦ;

$$\mathcal{E}_{т.ц} = 180 \cdot 10^3 \text{ кВт·ч;}$$

$$b_{т.ц}^{з.т} = 0,5b_{т.ц}^{з.к} + 0,5b_{т.ц}^{з.т} = 0,5 \cdot 0,397 + 0,5 \cdot 0,142 = 0,2695 \text{ кг/(кВт·ч);}$$

$$\Delta B_{з.к} = 180 \cdot 10^3 (0,34 - 0,2695) = 12,69 \text{ т/ч.}$$

Задача 2.17. На ТЭЦ, работающей со средним удельным расходом условного топлива на 1 кВт·ч выработанной электроэнергии $b_{т.ц}^{з.к} = 0,3$ кг/(кВт·ч), на базе теплового потребления (на отборном паре) произведено за год $\mathcal{E}_{т.ц}^{год} = 700 \cdot 10^6$ кВт·ч электроэнергии. Годовая выработка электроэнергии на ТЭЦ $\mathcal{E}_{т.ц}^{год}$ составила $1200 \cdot 10^6$ кВт·ч. КПД по выработке электроэнергии на конденсационных электростанциях энергосистемы $\eta_{к.с} = 0,38$. Определить КПД конденсационного цикла на ТЭЦ $\eta_{т.ц}^{\text{конд}}$ и годовую экономию натурального топлива в энергосистеме $\Delta B_{з.к}$, если теплота сгорания натурального топлива $Q_{н}^p = 16,76$ МДж/кг; $\eta_{к.у} = 0,91$; $\eta_{з.м} = 0,95$; $\eta_{т.п} = 0,98$. При расчете полагать, что удельные расходы топлива на выработку теплоты в районной котельной и на ТЭЦ одинаковы ($b_{кот}^t = b_{т.ц}^t$).

Ответ: $\eta_{т.ц}^{\text{конд}} = 0,238$; $\Delta B = 49736,8$ т/год.

Задача 2.18. Определить комбинированную выработку электроэнергии на ТЭЦ и экономию условного топлива в энергосистеме за 1 ч при отпуске из теплофикационных отборов турбины Т-100-130 $Q_{т.ц} = 540$ ГДж/ч, причем 65% отпускаемой теплоты осуществляется из нижнего отбора (остальное — из верхнего отбора). Давление в отборах: в верхнем $p_{от.в} = 0,2$ МПа; в нижнем — $p_{от.н} = 0,15$ МПа.

Начальные параметры пара перед турбиной $p_0 = 12,75$ МПа; $t_0 = 560$ С. Внутренний относительный КПД турбины части высокого и части среднего давления $\eta_{от}^{\text{чвд}} = \eta_{от}^{\text{чсд}} = 0,82$. Конденсат сетевых подогревателей на станции не теряется и не переохлаждается; КПД $\eta_{к.у} = 0,91$; $\eta_{з.м} = 0,96$; $\eta_{т.п} = 0,98$; КПД конденсационного цикла на ТЭЦ $\eta_{т.ц}^{\text{конд}} = 0,32$. Удельный расход теплоты на выработку 1 кВт·ч на конденсационных станциях энергосистемы $q_{к.с} = 9000$ кДж/(кВт·ч). Удельной выработкой электроэнергии на внутреннем теплоснабжении пренебречь. Для упрощения считать также, что удельные расходы топлива на выработку теплоты в районной котельной и на ТЭЦ одинаковы: $b_{т.ц}^t = b_{кот}^t$; $Q_{н}^p = 29,33$ МДж/кг.

Решение. На основе построения процесса расширения пара в турбине в h, s -диаграмме находим $h_0 = 3500$ кДж/кг; $h_{отб.в} = 2700$ кДж/кг; $h_{отб.н} = 2660$ кДж/кг; энтальпия конденсата отборного пара $h_{отб.в} = 507$ кДж/кг; $h'_{отб.н} = 465$ кДж/кг.

Удельная выработка электроэнергии паром верхнего отбора

$$\begin{aligned}\bar{s}_{т.в} &= 278 \frac{h_0 - h_{отб.в}}{h_{отб.в} - h'_{отб.в}} \eta_{эм} = \\ &= 278 \cdot \frac{3500 - 2700}{2700 - 507} \cdot 0,96 = 97,357 \text{ кВт} \cdot \text{ч/ГДж}.\end{aligned}$$

Удельная выработка электроэнергии паром нижнего отбора

$$\begin{aligned}\bar{s}_{т.н} &= 278 \frac{h_0 - h_{отб.н}}{h_{отб.н} - h'_{отб.н}} \eta_{эм} = \\ &= 278 \cdot \frac{840}{2195} \cdot 0,96 = 102,13 \text{ кВт} \cdot \text{ч/ГДж}.\end{aligned}$$

Полная часовая теплофикационная выработка электроэнергии на ТЭЦ

$$\begin{aligned}\mathcal{E}_{ТЭЦ}^{\tau} &= \bar{s}_{т.в} \cdot 0,35 Q_{\tau} + \bar{s}_{т.н} \cdot 0,65 Q_{\tau} = \\ &= 540 (0,35 \cdot 97,357 + 0,65 \cdot 102,13) = 54248,1 \text{ кВт} \cdot \text{ч/ч}.\end{aligned}$$

Конденсационная выработка электроэнергии на ТЭЦ за 1 ч

$$\mathcal{E}_{ТЭЦ}^{\kappa} = 100\,000 - 54248,1 = 45751,9 \text{ кВт} \cdot \text{ч/ч}.$$

Удельный расход условного топлива по выработке электроэнергии на отборном паре

$$b_{ТЭЦ}^{\tau} = \frac{0,123}{\eta_{к.у} \eta_{эм} \eta_{т.н}} = \frac{0,123}{0,91 \cdot 0,96 \cdot 0,98} = 0,144 \text{ кг/(кВт} \cdot \text{ч)}.$$

Удельный расход условного топлива по выработке электроэнергии конденсационным способом

$$b_{ТЭЦ}^{\kappa} = \frac{0,123}{\eta_{ТЭЦ}^{\kappa}} = \frac{0,123}{0,32} = 0,384 \text{ кг/(кВт} \cdot \text{ч)}.$$

Удельный расход условного топлива по выработке электроэнергии в энергосистеме

$$b_{кэс} = q_{кэс} / 29\,330 = 9000 / 29\,330 = 0,306 \text{ кг/(кВт} \cdot \text{ч)}.$$

Экономия условного топлива определяется по формуле академика Л. А. Мелентьева [10] (см. решение задачи 2.16):

$$\begin{aligned}\Delta B_{\tau, \kappa} &= \mathcal{E}_{ТЭЦ}^{\tau} (b_{кэс} - b_{ТЭЦ}^{\tau}) - \mathcal{E}_{ТЭЦ}^{\kappa} (b_{ТЭЦ}^{\kappa} - b_{кэс}) = \\ &= 54248,1 (0,306 - 0,144) - 45751,9 (0,384 - 0,306) = 5219,5 \text{ кг/ч}.\end{aligned}$$

Задача 2.19. Определить перерасход натурального топлива ($Q_{\#}^p = 21,78$ МДж/кг) на ТЭЦ вследствие аварийного простоя в течение суток турбины ПТ-60-130 ($p_0 = 13$ МПа; $t_0 = 560^\circ \text{C}$), отпускаявшей

потребителям пар из производственного отбора в количестве $D_n = 58$ т/ч и теплоту из теплофикационного отбора в количестве $Q_r = 180$ ГДж/ч. При аварийном отключении турбины тепловая нагрузка в том же количестве покрывалась за счет работы редуциционно-охлаждающей установки (РОУ), а недостающая электроэнергия подавалась из энергосистемы. При расчете принять $h_0 = 3500$ кДж/кг; энтальпия пара в промышленном отборе $h_n = 2975$ кДж/кг, а в теплофикационном отборе $h_r = 2760$ кДж/кг. Конденсат на станции не теряется ($\varphi_{в.к} = 1$), температура возвращаемого с производства конденсата $t_{в.к} = 80^\circ \text{C}$. Давление в теплофикационном отборе $p_r = 0,16$ МПа. Давление в промышленном отборе $p_n = 1,3$ МПа; КПД $\eta_{к.у} = 0,9$; $\eta_{эм} = 0,95$; $\eta_{т.п} = 0,98$. Удельный расход теплоты на 1 кВт·ч вырабатываемой электроэнергии в энергосистеме $q_{кэс} = 9000$ кДж/(кВт·ч); КПД конденсационного потока на ТЭЦ $\eta_{т.ц}^{\text{к}} = 0,32$. Теплофикационную выработку электроэнергии на внутреннем теплоснабжении не учитывать. Считать также, что КПД котельной ТЭЦ нетто равен КПД ТЭЦ по выработке теплоты.

Решение. Теплофикационная часовая выработка электроэнергии на базе отпуска пара из промышленного отбора

$$\begin{aligned} (\mathcal{E}_r)_{пр} &= \frac{(h_0 - h_n) D_n}{3600} \eta_{эм} \cdot 10^3 = \\ &= 58 \cdot 10^3 \left(\frac{3500 - 2975}{3600} \right) \cdot 0,95 = 8035,4 \text{ кВт} \cdot \text{ч/ч}. \end{aligned}$$

Теплофикационная часовая выработка электроэнергии на базе отпуска теплоты из отопительного отбора

$$(\mathcal{E}_r)_{от} = \bar{\mathcal{E}}_r Q_r = 278 \frac{3500 - 2760}{2760 - 470} \cdot 0,95 \cdot 180 = 15361,1 \text{ кВт} \cdot \text{ч/ч}.$$

Суммарная часовая теплофикационная выработка электроэнергии на ТЭЦ

$$\mathcal{E}_{т.ц}^{\text{т}} = (\mathcal{E}_r)_{пр} + (\mathcal{E}_r)_{от} = 8035,4 + 15361,6 = 23\,397 \text{ кВт} \cdot \text{ч/ч}.$$

Конденсационная выработка электроэнергии на ТЭЦ

$$\mathcal{E}_{т.ц}^{\text{к}} = N_{\text{э}} \tau - \mathcal{E}_{т.ц}^{\text{т}} = 60\,000 \cdot 1 - 23\,397 = 36\,603 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Удельный расход топлива на 1 кВт·ч, выработанный на ТЭЦ отборным паром,

$$b_{т.ц}^{\text{т}} = \frac{0,123}{\eta_{к.у} \eta_{эм} \eta_{т.п}} = \frac{0,123}{0,9 \cdot 0,95 \cdot 0,98} = 0,147 \text{ кг/(кВт} \cdot \text{ч)}.$$

Удельный расход условного топлива на 1 кВт·ч, выработанный на ТЭЦ конденсационным потоком,

$$b_{т.ц}^{\text{к}} = \frac{0,123}{0,32} = 0,384 \text{ кг/кВт} \cdot \text{ч}.$$

Удельный расход условного топлива на 1 кВт·ч, выработанный в энергосистеме при $(Q_n^p)_{кэс} = 29,33$ МДж/кг,

$$b_{\text{кэс}} = \frac{q_{\text{кэс}}}{Q_{\text{н}}^{\text{р}}} = \frac{9000}{29\,330} = 0,307 \text{ кг}/(\text{кВт} \cdot \text{ч}).$$

Суточный перерасход натурального топлива на ТЭЦ

$$\begin{aligned} B &= \frac{(Q_{\text{н}}^{\text{р}})}{(Q_{\text{н}}^{\text{р}})_{\text{н.т}}} \cdot 24 [(b_{\text{кэс}} - b_{\text{тэц}}^{\text{э.т}}) \mathfrak{E}_{\text{тэц}}^{\text{э.т}} - (b_{\text{тэц}}^{\text{э.к}} - b_{\text{кэс}}) \mathfrak{E}_{\text{тэц}}^{\text{э.к}}] = \\ &= \frac{29,33}{21,319} \cdot 24 [(0,307 - 0,147) \cdot 23\,397 - (0,384 - 0,307) \cdot 36\,603] = \\ &= 32,319(3743,52 - 2832,15) = 29,45 \text{ т/сут.} \end{aligned}$$

Задача 2.20. Решить задачу 2.19, если в период суточного простоя турбины ПТ-60-130 теплоту внешнему потребителю пришлось отпустить в том же количестве не из РОУ, а от районной котельной. При решении задачи учесть также теплофикационную выработку на регенеративном подогреве конденсата отборного пара и основного конденсата турбины. Дополнительные данные: давление в конденсаторе турбины $p_{\text{к}} = 0,004$ МПа; внутренний относительный КПД турбины в части низкого давления $\eta_{oi}^{\text{члд}} = 0,7$; температура питательной воды на ТЭЦ $t_{\text{п.в}} = 230^{\circ}\text{C}$; КПД районной котельной $\eta_{\text{кот}}^{\text{н}} = 0,83$; КПД ТЭЦ по отпуску теплоты $\eta_{\text{тэц}}^{\text{н}} = 0,88$.

Решение.

$$\begin{aligned} \Delta B &= \frac{(Q_{\text{н}}^{\text{р}})_{\text{кэс}}}{(Q_{\text{н}}^{\text{р}})_{\text{н.т}}} \cdot 24 [(b_{\text{кэс}} - b_{\text{тэц}}^{\text{э.т}}) \mathfrak{E}_{\text{тэц}}^{\text{э.т}} - (b_{\text{тэц}}^{\text{э.к}} - b_{\text{кэс}}) \mathfrak{E}_{\text{тэц}}^{\text{э.к}} + \\ &+ Q_{\text{в.п}} (b_{\text{кот}}^{\text{н}} - b_{\text{тэц}}^{\text{н}})] = \frac{29,33}{21,319} \cdot 24 [(0,307 - 0,147) \cdot 34969,7 - (0,338 - 0,307) \times \\ &\times 25030,3 + 305,5(41,08 - 38,75)] = 182,58 \text{ т/сут.} \end{aligned}$$

Задача 2.21. Определить часовую экономию натурального топлива в энергосистеме в результате реконструкции турбины К-25-90 и перевода ее на режим работы с противодавлением $p_{\text{нд}} = 0,3$ МПа. Давление в конденсаторе турбины К-25-90 $p_{\text{к}} = 4,0$ кПа. Начальные параметры пара $p_0 = 9,0$ МПа; $t_0 = 530^{\circ}\text{C}$; внутренний относительный КПД турбины до и после реконструкции $\eta_{oi} = 0,82$; $\eta_{\text{эм}} = 0,95$; $\eta_{\text{кв}} = 0,89$; $\eta_{\text{т.п}} = 0,98$. Теплота сгорания натурального топлива $Q_{\text{н}}^{\text{р}} = 11,73$ МДж/кг. С переводом турбины К-25-90 на режим работы с противодавлением недостающая мощность (до $N_3 = 25$ МВт) восполняется энергосистемой. Удельный расход условного топлива по выработке электроэнергии в энергосистеме $b_{\text{кэс}} = 330$ г/(кВт · ч); $(Q_{\text{н}}^{\text{р}})_{\text{кэс}} = 29,33$ МДж/кг. При работе конденсационной турбины отпуск теплоты в том же количестве, что и при работе турбины на противодавление, осуществлялся непосредственно из котла $Q_{\text{т}} = 257$ ГДж/кг. Температура питательной воды на ТЭЦ $t_{\text{п.в}} = 220^{\circ}\text{C}$; температура возвращаемого конденсата $t_{\text{в.к}} = 60^{\circ}\text{C}$; изменения в схеме регенерации не учитывать.

Решение. Из построения процесса расширения пара в турбине в h , s -диаграмме находим: $h_0 = 3450$ кДж/кг; $h_{\text{к}} = 2290$ кДж/кг. Энтальпия пара при $p_{\text{нд}} = 0,3$ МПа; $h_{\text{нд}} = 2820$ кДж/кг. Энтальпия пара условного (среднего) регенеративного отбора для подогрева конденсата турбины

$$h_{p_k}^{cp} = 2780 \text{ кДж/кг} \left(t_{cp} = \frac{220 + 29}{2} = 124,5^\circ \text{ C} \right).$$

Расход пара из противодавления турбины

$$D_T = \frac{Q_T}{h_{пл} - h'_{п.к}} = \frac{257 \cdot 10^6}{2820 - 251} = 100 \text{ т/ч.}$$

Мощность противодавленческой турбины

$$N_{пл} = \frac{D \cdot 10^3}{3600} (h_0 - h_{пл}) \eta_{эм} = \\ = \frac{100 \cdot 10^3}{3600} (3450 - 2820) \cdot 0,95 = 16\,630 \text{ кВт.}$$

Теплофикационная часовая выработка электроэнергии

$$\mathcal{E}_T = N_{пл} \tau = 16\,630 \cdot 1 = 16\,630 \text{ кВт} \cdot \text{ч.}$$

Дополнительная выработка электроэнергии в энергосистеме

$$\mathcal{E}_x = 25\,000 - 16\,630 = 9\,370 \text{ кВт} \cdot \text{ч.}$$

КПД конденсационного цикла на ТЭЦ с учетом регенеративного подогрева конденсата турбины

$$\eta_{ik}^p = \eta_{ik} \frac{1 + e_{p.k}}{1 + \eta_{ik} e_{p.k}}; \\ \eta_{ik} = \frac{H_i}{h_0 - h'_{п.к}} = \frac{3450 - 2290}{3450 - 121} = 0,348; \\ e_{p.k} = \frac{3450 - 2780}{3450 - 2290} \cdot \frac{945 - 121}{2780 - 945} = 0,259; \\ \eta_{п.к}^p = 0,348 \frac{1 + 0,259}{1 + 0,348 \cdot 0,259} = 0,40; \\ \eta_{п.к}^p = \eta_{п.к}^p \eta_{к.у} \eta_{эм} = 0,40 \cdot 0,89 \cdot 0,95 = 0,339; \\ \Delta B = \frac{(Q_{п.к}^p)_{кэс}}{(Q_{п.к}^p)_{н.т}} [\mathcal{E}_T (b_{кэс} - b_{ТЭЦ}^{т.э}) - \mathcal{E}_x (b_{ТЭЦ}^{к.э} - b_{кэс})] = \\ = \frac{29\,330}{11\,730} \left[16\,630 \left(0,330 - \frac{0,123}{0,95 \cdot 0,89 \cdot 0,98} \right) - \right. \\ \left. - 9\,370 \left(\frac{0,123}{0,339} - 0,330 \right) \right] = 6,82 \text{ т/ч.}$$

Задача 2.22. Определить годовой отпуск пара из отопительного отбора, если экономия условного топлива на ТЭЦ с турбинами Т-25-90 от комбинированной выработки теплоты и электроэнергии за год составила $25,0 \cdot 10^3$ т/год. Энтальпия пара перед турбинами $h_0 = 3500$ кДж/кг. Среднее значение энтальпии отборного пара турбин $h_{отб.т} = 2890$ кДж/кг. Давление в отборе $p_{отб.т} = 0,2$ МПа. Конденсат отборного пара на станции не теряется и не переохлаждается; КПД $\eta_{к.у} = 0,89$; $\eta_{эм} = 0,96$; $\eta_{т.п} = 0,98$; КПД конденсационного потока на

ТЭЦ $\eta_{\text{ТЭЦ}}^{3, \kappa} = 0,32$. Теплофикационную выработку электроэнергии на внутреннем теплоснабжении (на базе регенеративного подогрева конденсата и питательной воды) не учитывать; $Q_{\text{н}}^{\text{р}} = 29,33$ МДж/кг.

Ответ: $D_{\text{отб}}^{\text{го}} = 648,4 \cdot 10^3$ т/год.

Задача 2.23. Применительно к условиям задачи 2.22 определить годовые теплофикационную и конденсационную выработки электроэнергии на ТЭЦ ($\mathcal{E}_{\text{т}}$, $\mathcal{E}_{\text{конд}}$), если время использования установленной мощности на ТЭЦ $\tau_{\text{г}} = 6500$ ч, а число турбин $z = 2$.

Ответ: $\mathcal{E}_{\text{т}} = 105 \cdot 10^6$ кВт·ч/год; $\mathcal{E}_{\text{конд}} = 220 \cdot 10^6$ кВт·ч/год.

Задача 2.24. Определить изменение часового расхода условного топлива на ТЭЦ при повышении давления в теплофикационном отборе турбины Т-50-130 $p_{\text{отб.т}}$ с 0,12 до 0,25 МПа. Количество отпускаемой теплоты с ТЭЦ $Q_{\text{т}} = 200$ ГДж/ч остается неизменным. В обоих случаях турбина работает с номинальной мощностью. Конденсат отборного пара на станции не теряется и не переохлаждается. Энтальпия пара перед турбиной $h_0 = 3400$ кДж/кг, энтальпия пара в отборах $h_{\text{отб}}^{0,12} = 2600$ кДж/кг; $h_{\text{отб}}^{0,25} = 2708$ кДж/кг; энтальпии конденсата отборного пара соответственно равны $h'_{\text{отб } 0,12} = 436$ кДж/кг; $h'_{\text{отб } 0,25} = 528$ кДж/кг. Удельный расход теплоты на выработку электроэнергии на ТЭЦ по конденсационному циклу $q_{\text{конд}} = 11\,610$ кДж/(кВт·ч) КПД $\eta_{\text{к.у}} = 0,9$; КПД $\eta_{\text{эм}} = 0,96$; КПД трубопроводов $\eta_{\text{т.п}} = 0,98$; $Q_{\text{н}}^{\text{р}} = 29,33$ МДж/кг.

Решение. Теплофикационная выработка электроэнергии на ТЭЦ в случае давления пара в отборе $p_{\text{отб.т}} = 0,12$ МПа

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{\text{т}}^{0,12} &= \bar{\mathcal{E}}_{\text{т}} Q_{\text{т}} = 278 \frac{(h_0 - h_{\text{отб}}^{0,12}) \eta_{\text{эм}}}{h_{\text{отб}}^{0,12} - h'_{\text{отб}}^{0,12}} Q_{\text{т}} = \\ &= 278 \frac{3400 - 2600}{2600 - 436} \cdot 0,96 \cdot 200 = 19732,3 \text{ кВт} \cdot \text{ч}. \end{aligned}$$

Теплофикационная выработка электроэнергии на ТЭЦ в случае давления пара в отборе $p_{\text{отб.т}} = 0,25$ МПа

$$\mathcal{E}_{\text{т}}^{0,25} = 278 \frac{3400 - 2708}{2708 - 528} \cdot 0,96 \cdot 200 = 16943,2 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Конденсационная выработка электроэнергии на ТЭЦ в рассматриваемых вариантах:

$$\mathcal{E}_{\text{конд}}^{0,12} = 50\,000 - 19732,3 = 30267,7 \text{ кВт} \cdot \text{ч};$$

$$\mathcal{E}_{\text{конд}}^{0,25} = 500\,000 - 16943,2 = 33056,8 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Общий перерасход условного топлива за 1 ч

$$\Delta B = (\mathcal{E}_{\text{т}}^{0,12} - \mathcal{E}_{\text{т}}^{0,25}) (b_{\text{кэс}} - b_{\text{ТЭЦ}}^{3, \kappa}) + (\mathcal{E}_{\text{конд}}^{0,25} - \mathcal{E}_{\text{конд}}^{0,12}) (b_{\text{ТЭЦ}}^{3, \kappa} - b_{\text{кэс}}).$$

Так как $\Delta \mathcal{E}_{\text{т}} = \Delta \mathcal{E}_{\text{конд}}$, то $\Delta B = \Delta \mathcal{E}_{\text{т}} (b_{\text{ТЭЦ}}^{3, \kappa} - b_{\text{ТЭЦ}}^{3, \tau})$;

$$b_{\text{ТЭЦ}}^{3, \kappa} = \frac{q_{\text{конд}}}{(Q_{\text{н}}^{\text{р}})_{\text{у}}} = \frac{11\,610}{29\,330} \approx 0,396 \text{ кг}/(\text{кВт} \cdot \text{ч});$$

$$b_{\text{ТЭЦ}}^{3, \tau} = \frac{0,123}{\eta_{\text{к.у}} \eta_{\text{эм}} \eta_{\text{т.п}}} = \frac{0,123}{0,9 \cdot 0,96 \cdot 0,98} = 0,145 \text{ кг}/(\text{кВт} \cdot \text{ч});$$

$$\Delta B = (19732,3 - 16943,2) \cdot (0,396 - 0,145) = 700,06 \text{ кг/ч}.$$

Задача 2.25. Определить критическую* часовую теплофикационную выработку электроэнергии на ТЭЦ мощностью $N_z = 500$ МВт, работающей в энергосистеме. Средний удельный расход условного топлива на электростанциях энергосистемы $b_{кэс} = 0,34$ кг/(кВт·ч) при $Q_n^p = 29,33$ МДж/кг. КПД конденсационного потока на ТЭЦ $\eta_{тэц}^{з.к} = 0,32$; $\eta_{к.у} = 0,9$; $\eta_{эм} = 0,97$; $\eta_{т.п} = 0,98$.

Решение. Из уравнения академика Л. А. Мелентьева [10] $\Delta B = 0 = \mathcal{E}_t(b_{кэс} - b_{тэц}^{з.к}) - \mathcal{E}_{конд}(b_{тэц}^{з.к} - b_{кэс})$.

С учетом того, что $\mathcal{E}_{конд} = \mathcal{E}_{тэц} - \mathcal{E}_t$, получаем зависимость

$$\begin{aligned}\mathcal{E}_t &= \mathcal{E}_{тэц} \frac{b_{тэц}^{з.к} - b_{кэс}}{b_{тэц}^{з.к} - b_{тэц}^{з.т}} = 500 \cdot 10^3 \cdot 1 \cdot \frac{\frac{0,123}{0,32} - 0,34}{\frac{0,123}{0,32} - \frac{0,123}{0,9 \cdot 0,97 \cdot 0,98}} = \\ &= 500 \cdot 10^3 \cdot \frac{0,044}{0,24} = 91\,667 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.\end{aligned}$$

Задача 2.26. Определить среднегодовой КПД по выработке электроэнергии на ТЭЦ, режим работы которой определяется следующими данными: годовая выработка электроэнергии $\mathcal{E}_{год} = 3,5 \cdot 10^9$ кВт·ч/год, годовой отпуск теплоты из теплофикационных отборов $Q_{год} = 20 \cdot 10^6$ ГДж/год; энтальпия пара перед турбинами $h_0 = 3490$ кДж/кг ($p_0 = 13$ МПа); энтальпия пара в конденсаторах турбин $h_k = 2500$ кДж/кг ($p_k = 5,0$ кПа); энтальпия пара в теплофикационных отборах $h_{отб.т} = 2800$ кДж/кг ($p_t = 0,15$ МПа); температура питательной воды на ТЭЦ $t_{п.в} = 230^\circ$ С. Значения параметров пара и питательной воды принимаются средними за год. Конденсат на станции не теряется и не переохлаждается; $\eta_{к.у} = 0,92$; $\eta_{эм} = 0,96$; $\eta_{т.п} = 0,98$.

Решение. Теплофикационная выработка электроэнергии на ТЭЦ с регенерацией

$$\mathcal{E}_t^{год} = \mathcal{E}_t Q_{год} = \bar{\mathcal{E}}_{в.п} (1 + e_{p_t}) Q_{год},$$

где

$$\bar{\mathcal{E}}_{в.п} = 278 \frac{h_0 - h_{отб.т}}{h_{отб.т} - h'_{отб.т}} \eta_{эм} = 278 \frac{3490 - 2800}{2800 - 469} 0,96 = 77,4 \text{ кВт} \cdot \text{ч/ГДж};$$

$$e_{p_t} = \frac{h_0 - h_{p_t}}{h_0 - h_{отб.т}} \cdot \frac{h'_{п.в} - h'_{отб.т}}{h_{p_t} - h'_{п.в}}.$$

Здесь $h_{p_t} = 2980$ кДж/кг — энтальпия пара среднего (условного) отбора для регенеративного подогрева конденсата сетевых подогревателей (методику нахождения h_{p_t} см. в задаче 2.10);

$$e_{p_t} = \frac{3490 - 2980}{3490 - 2800} \cdot \frac{991 - 469}{2980 - 991} = 0,19;$$

$$\mathcal{E}_t^{год} = 77,4 (1 + 0,19) \cdot 20 \cdot 10^6 = 1,842 \cdot 10^9 \text{ кВт} \cdot \text{ч/год}.$$

Конденсационная выработка электроэнергии на ТЭЦ

$$\mathcal{E}_{конд}^{год} = \mathcal{E}_{год} - \mathcal{E}_t^{год} = 3,5 \cdot 10^9 - 1,842 \cdot 10^9 = 1,658 \cdot 10^9 \text{ кВт} \cdot \text{ч/год}.$$

* Под критической понимается теплофикационная выработка электроэнергии, при которой экономия топлива в энергосистеме равна нулю ($\Delta B = 0$).

КПД конденсационного цикла на ТЭЦ с учетом регенеративного подогрева основного конденсата турбин

$$\eta_{p.k}^2 = \eta_k^2 \frac{1 + e_{p.k}}{1 + e_{p.k} \eta_k^2},$$

где η_k^2 — КПД конденсационного цикла без регенерации:

$$\eta_k^2 = \frac{H_i}{h_0 - h'_k} \eta_{k.y} \eta_{зм} \eta_{т.п} = \frac{3490 - 2500}{3490 - 136} \cdot 0,92 \cdot 0,96 \cdot 0,98 = 0,254;$$

$$e_{p.k} = \frac{h_0 - h_{p.k}}{h_0 - h'_k} \frac{h'_{п.н} - h'_k}{h_{p.k} - h'_{п.н}}.$$

Здесь $h_{p.k} = 2810$ Дж/кг — энтальпия пара среднего (условного) отбора для регенеративного подогрева основного конденсата турбин (методика нахождения $h_{p.k}$ см. в задаче 2.12);

$$e_{p.k} = \frac{3490 - 2810}{3490 - 2500} \cdot \frac{991 - 136}{2810 - 991} = 0,322;$$

$$\eta_{p.k}^2 = 0,54 \frac{1 + 0,322}{1 + 0,322 \cdot 0,254} = 0,31.$$

КПД ТЭЦ по выработке электроэнергии на отборном паре

$$\eta_{ТЭЦ}^{э.т} = \eta_{k.y} \eta_{зм} \eta_{т.п} = 0,92 \cdot 0,96 \cdot 0,98 = 0,865.$$

Среднегодовой КПД по выработке электроэнергии на ТЭЦ

$$(\eta_{ТЭЦ}^2)_{ср} = \frac{\eta_{p.k}^2 \mathcal{E}_{год}^{год} + \eta_{ТЭЦ}^{э.т} \mathcal{E}_T^{год}}{\mathcal{E}_{год}} = \frac{(0,31 \cdot 1,658 + 0,865 \cdot 1,842) \cdot 10^9}{3,5 \cdot 10^9} = 0,60.$$

Задача 2.27. Определить годовой расход топлива на ТЭЦ с двумя турбинами ПТ-25-90 ($p_0 = 8,8$ МПа; $t_0 = 530^\circ \text{C}$). Время работы турбин в году: $\tau_1 = 8000$ ч; $\tau_2 = 7800$ ч. Годовая выработка электроэнергии на станции $\mathcal{E}_{год} = 0,30 \cdot 10^9$ кВт·ч/год. Годовой отпуск пара из промышленных отборов $D_{отб.п} = 600 \cdot 10^3$ т/год ($p_{отб.п} = 0,8$ МПа). Годовой отпуск пара из теплофикационных отборов $D_{отб.т} = 500 \cdot 10^3$ т/год ($p_{отб.т} = 0,12$ МПа). Коэффициент холостого расхода пара турбинами $X = 0,072$. Давление в конденсаторах турбин $p_k = 0,05$ МПа. Средний относительный КПД турбин $\eta_{oi} = 0,85$; $\eta_{зм} = 0,97$; $\eta_{k.y} = 0,9$; $\eta_{т.п} = 0,98$, коэффициент регенерации $k_p = 1,2$. Температура питательной воды котлов $t_{п.в} = 220^\circ \text{C}$. Расход пара на собственные нужды котлотурбинного цеха $\alpha_{с.н}^{кт} = 1,2\%$ расхода пара турбинами; $Q_p^* = 29,33$ МДж/кг.

Решение. Годовой расход пара турбинами без регенерации определяется по формуле проф. В. И. Гриневецкого [11]

$$D_{год} = d_n m x N_n + d_n (1 - x) \mathcal{E}_{год} + y_n (D_{отб.п})_{год} + y_t (D_{отб.т})_{год},$$

$$d_n = \frac{3600}{H_0 \eta_{oi} \eta_{зм}} = \frac{3600}{(3460 - 2060) \cdot 0,85 \cdot 0,97} = 3,1 \text{ кг/(кВт} \cdot \text{ч)} — \text{удельный расход пара;}$$

$$m = \tau_1 + \tau_2 = 8000 + 7800 = 15\,800 \text{ машино-часов.}$$

Из процесса расширения пара в турбине на h , s -диаграмме определяем $h_{отб.т} = 2660$ кДж/кг; $h_{отб.п} = 2960$ кДж/кг; $h_k = 2270$ кДж/кг. Коэффициенты недовыработки мощности отборного пара

$$y_n = \frac{h_{\text{отб.п}} - h_k}{h_0 - h_k} = \frac{2960 - 2270}{3460 - 2270} = 0,579;$$

$$y_r = \frac{h_{\text{отб.т}} - h_k}{h_0 - h_k} = \frac{2660 - 2270}{3460 - 2270} = 0,327;$$

$$D_{\text{год}} = 3,1 \cdot 15 \cdot 800 \cdot 0,072 \cdot 25 \cdot 10^3 + 3,1 (1 - 0,072) \cdot 0,30 \cdot 10^9 + 0,579 \cdot 600 \times \\ \times 10^6 + 0,327 \cdot 500 \cdot 10^6 = 88,164 \cdot 10^6 + 863 \cdot 10^6 + 347,4 \cdot 10^6 + 163,5 \cdot 10^6 = \\ = 1462,05 \cdot 10^6 \text{ кг/год.}$$

С учетом регенерации расход пара турбинами

$$D_{\text{год}}^p = k_p D_{\text{год}} = 1,2 \cdot 1,46205 \cdot 10^6 = 1,754 \cdot 10^6 \text{ т/год.}$$

Выработка пара котлами с учетом собственных нужд и потерь в трубопроводах

$$D_k^{6p} = D_{\text{год}}^p \cdot 1,012 \cdot \frac{1}{0,98} \approx 1,812 \cdot 10^6 \text{ т/год.}$$

Расход условного топлива

$$B_{\text{ТЭЦ}} = \frac{D^{6p} (h_0 - h'_{\text{п.в}})}{\eta_{\text{к.у}} (Q_{\text{н}}^p)} = \frac{1,812 (3460 - 944) \cdot 10^9}{0,9 \cdot 29330} = 172,70 \cdot 10^6 \text{ кг/год} = \\ = 172,70 \cdot 10^3 \text{ т/год.}$$

Задача 2.28. Применительно к условиям задачи 2.27 определить удельные расходы условного топлива на выработку теплоты и электроэнергии. Конденсат отборного пара на ТЭЦ не теряется. Температура конденсата теплофикационного отбора равна температуре насыщения пара $(t_{\text{в.к}})_r = t_{\text{отб.т}}^{\text{н}} = 104^\circ \text{C}$; температура возвращаемого конденсата промышленного отбора $(t_{\text{в.к}})_n = 80^\circ \text{C}$.

Решение. Согласно методике Министерства энергетики и электрификации СССР распределение топлива на ТЭЦ между выработками электроэнергии и теплоты ведется по формулам

$$B_{\text{ТЭЦ}}^{\text{т.э}} = B_{\text{ТЭЦ}} \frac{(Q_{\text{т}})^{\text{год}}}{(Q_{\text{к.о}}^{\text{н}})^{\text{год}}}; \quad B_{\text{ТЭЦ}}^{\text{э.э}} = B_{\text{ТЭЦ}} - B_{\text{ТЭЦ}}^{\text{т.э}}.$$

Здесь $(Q_{\text{т}})^{\text{год}}$ — количество отпущенной теплоты с ТЭЦ; $(Q_{\text{к.о}}^{\text{н}})^{\text{год}}$ — расход теплоты из котельного отделения (нетто):

$$(Q_{\text{т}})^{\text{год}} = D_{\text{отб.т}}^{\text{год}} [(h_{\text{отб.т}} - h'_{\text{отб.т}}) + D_{\text{отб.п}}^{\text{год}} (h_{\text{отб.п}} - h'_{\text{в.к}})] \cdot 0,98 = \\ = [500 \cdot 10^6 (2660 - 435) + 600 \cdot 10^6 (2960 - 335)] \cdot 0,98 = 2,633 \cdot 10^6 \text{ ГДж/год;} \\ (Q_{\text{к.о}}^{\text{н}})^{\text{год}} = D_{\text{год}}^p (h_0 - h'_{\text{п.в}}) = 1,754 \cdot 10^9 (3460 - 944) = 4,403 \cdot 10^6 \text{ ГДж/год;}$$

$$B_{\text{ТЭЦ}}^{\text{т.э}} = 172,70 \cdot 10^3 \cdot \frac{2,633 \cdot 10^6}{4,403 \cdot 10^6} = 103,27 \cdot 10^3 \text{ т/год;}$$

$$B_{\text{ТЭЦ}}^{\text{э.э}} = (172,70 - 103,27) \cdot 10^3 = 69,43 \cdot 10^3 \text{ т/год.}$$

Удельные расходы топлива

$$b_{\text{ТЭЦ}}^{\text{э.э}} = \frac{B_{\text{ТЭЦ}}^{\text{э.э}}}{\mathcal{E}_{\text{год}}} = \frac{69,43 \cdot 10^6}{30 \cdot 10^6} = 0,231 \text{ кг/(кВт} \cdot \text{ч);}$$

$$b_{\text{ТЭЦ}}^{\text{т.э}} = \frac{B_{\text{ТЭЦ}}^{\text{т.э}}}{(Q_{\text{т}})^{\text{год}}} = \frac{103,27 \cdot 10^6}{2,633 \cdot 10^6} = 39,22 \text{ кг/ГДж.}$$

Задача 3.1. Определить потерю мощности в паровой турбине ΔN при дросселировании пара в системе парораспределения с $p_0 = 3,5$ МПа; $t_0 = 435^\circ \text{C}$ до $p'_0 = 3,3$ МПа. Расход пара в головную часть турбины $D_T = 30$ кг/с.

Решение. Задача может быть решена двумя методами: 1) графическим — путем приращения энтропии системы в процессе дросселирования с последующим расчетом потери мощности по формуле Гюи—Стодолы; 2) эксергетическим, по которому находят эксергию до и после процесса дросселирования и потерю мощности определяют как разность этих эксергий.

По первому методу находят с помощью h , s -диаграммы водяного пара [3] энтропию пара перед турбиной по заданным значениям $p_0 = 3,5$ МПа и $t_0 = 435^\circ \text{C}$: $s_n = 6,96$ кДж/(кг·К), а затем при постоянном значении $h = 3300$ кДж/кг находят при $p'_0 = 3,3$ МПа $s'_n = 6,98$ кДж/(кг·К). Затем по формуле Гюи—Стодолы

$$\Delta N = T_{\text{о.с}} \Delta s D_T = 293 \cdot (6,98 - 6,96) \cdot 30 = 176 \text{ кВт},$$

где $T_{\text{о.с}} = 293$ К — температура окружающей среды; $\Delta s = s'_n - s_n$ — изменение энтропии в процессе; D_T — расход пара.

По второму методу находят эксергию потока в двух точках процесса дросселирования по формуле эксергии для потока вещества [3]:

$$E_0 = D_T [h_0 - h_{\text{о.с}} - T_{\text{о.с}}(s_0 - s_{\text{о.с}})] = 30 [3300 - 83,8 - 29,3(6,96 - 0,297)] = 37\,918 \text{ кВт}.$$

$$E'_0 = D_T [h_0 - h_{\text{о.с}} - T_{\text{о.с}}(s'_0 - s_{\text{о.с}})] = 30 [3300 - 83,8 - 293(6,98 - 0,297)] = 37\,742 \text{ кВт}.$$

Потеря мощности в турбине равна изменению эксергии в процессе дросселирования:

$$\Delta N = \Delta E = E_0 - E'_0 = 37\,918 - 37\,742 = 176 \text{ кВт}.$$

Задача 3.2. Определить потерю мощности при дросселировании в регулирующем клапане промышленного отбора, если давление в камере отбора $p_{\text{пр}} = 1,55$ МПа; $h_{\text{пр}} = 3040$ кДж/кг, а давление за клапаном $p'_{\text{пр}} = 1,40$ МПа; расход пара в часть низкого давления турбины $D_{\text{чнд}} = 21$ кг/с.

Ответ: $\Delta N = 346$ кВт.

Задача 3.3. Определить потерю мощности при дросселировании пара в парораспределительных органах турбины ПТ-135-130, если начальные параметры пара $p_0 = 13,5$ МПа; $t_0 = 555^\circ \text{C}$, а конечное давление $p'_0 = 12,7$ МПа ($h_0 = \text{const}$). Расход пара в головную часть турбины $D_T = 211$ кг/с.

Ответ: $\Delta N = 1845$ кВт.

Задача 3.4. Определить потерю мощности паром промышленного отбора турбины при установке паропреобразователя, потеря давления

пара в котором составляет $\Delta p = 0,25$ МПа. Давление в линии промышленного потребителя $p_{\text{пр}} = 1,1$ МПа; $h_{\text{пр}} = 2980$ кДж/кг. Расход пара на паропреобразователь $D_{\text{п}} = 30$ т/ч.

Ответ: $\Delta N = 244$ кВт.

Задача 3.5. Определить потерю мощности при дросселировании в парораспределительных органах турбины Т-250-240, если давление перед стопорным клапаном $p_0 = 25$ МПа; $t_0 = 540^\circ \text{C}$, а давление перед соплами $p'_0 = 24$ МПа. Расход пара $D_{\text{т}} = 250$ кг/с.

Ответ: $\Delta N = 1100$ кВт.

Задача 3.6. Определить экономию топлива на ТЭЦ при подаче в отопительный отбор турбины Т-50-130 пара вторичных энергетических ресурсов из испарительной системы печи в количестве $D_{\text{вэп}} = 40$ т/ч при времени работы в год $\tau_{\text{г}} = 5000$ ч. Давление в отборе $p_{\text{отб}} = 0,15$ МПа. Энтальпии пара в отборе и пара из испарительной системы принять равными $h_{\text{отб}} = h_{\text{вэп}} = 2750$ кДж/кг. Начальная энтальпия пара перед турбиной и конечная в конденсаторе турбины соответственно равны $h_0 = 3480$ кДж/кг и $h_{\text{к}} = 2230$ кДж/кг ($p_{\text{к}} = 5$ кПа); $\eta_{\text{к.у}} = 0,90$; $Q_{\text{н}}^{\text{р}} = 29\,330$ кДж/кг; $\eta_{\text{т.л}} = 0,98$; $h'_{\text{доб}} = 100$ кДж/кг.

Решение. Находят количество теплоты, вносимой паром испарительного охлаждения в отопительный отбор по формуле:

$$Q_{\text{вэп}} = D_{\text{вэп}} (h_{\text{вэп}} - h'_{\text{доб}}) = \frac{40 \cdot 10^3}{3600} (2750 - 100) = 29\,440 \text{ кВт.}$$

Коэффициент ценности пара отопительного отбора

$$\xi_{\text{от}} = y [1 + k_{\text{с}} (1 - y)],$$

где $y = \frac{h_{\text{отб}} - h_{\text{к}}}{h_0 - h_{\text{к}}}$ — коэффициент недовыработки мощности паром отопительного отбора; $k_{\text{с}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{h'_0 - h'_{\text{к}}}{h_0 - h'_0}$ — коэффициент тепловой схемы;

значения h'_0 — энтальпии кипящей воды при начальном давлении p_0 и энтальпии конденсата — находят по таблицам свойств водяного пара [11] по p_0 и $p_{\text{к}}$: $h'_0 = 1510$ кДж/кг; $h'_{\text{к}} = 136$ кДж/кг.

По заданным значениям энтальпий находят

$$y = \frac{h_{\text{отб}} - h_{\text{к}}}{h_0 - h_{\text{к}}} = \frac{2750 - 2230}{3480 - 2230} = 0,416.$$

Затем находят $k_{\text{с}}$ и ξ :

$$k_{\text{с}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1519 - 136}{3480 - 1510} = 0,348;$$

$$\xi = y [1 + k_{\text{с}} (1 - y)] = 0,416 [1 + 0,348 (1 - 0,416)] = 0,503.$$

Находят экономию теплоты в схеме турбины от подачи в отопительный отбор пара вторичных энергоресурсов (внешний для схемы источник подачи теплоты)

$$\Delta Q = Q_{\text{вэп}} \xi = 29\,440 \cdot 0,416 = 12\,247 \text{ кВт.}$$

Экономия условного топлива

$$\Delta B = \frac{\Delta Q}{Q_{\text{н}}^p \eta_{\text{к.у}} \eta_{\text{т.п}}} = \frac{12\,247}{29\,330 \cdot 0,9 \cdot 0,98} = 0,473 \text{ кг/с} = 1704 \text{ кг/ч.}$$

Если установка испарительного охлаждения работает 5000 ч в год, то экономия топлива за год

$$B_{\text{год}} = \Delta B_{\text{ч}} \tau_{\text{г}} = 1704 \cdot 5000 = 8521 \cdot 10^3 \text{ кг/год} = 8521 \text{ т/год.}$$

Задача 3.7. Определить срок окупаемости от сооружения паропровода от цеха до ТЭЦ для подачи части избыточного пара вторичных энергоресурсов в отопительный отбор турбины Т-100-130 при следующих условиях: стоимость паропровода $K = 350$ тыс. руб., цена замыкающего топлива (условного) в районе $\Pi_{\text{т}} = 39$ руб/т, расход пара по паропроводу $D_{\text{вэп}} = 45$ т/ч; $h_{\text{вэп}} = 2650$ кДж/кг; $h_{\text{отб}} = 2780$ кДж/кг; $p_{\text{отб}} = p_{\text{вэп}} = 0,2$ МПа; $h'_{\text{доб}} = 150$ кДж/кг; $h_0 = 3480$ кДж/кг; $h_{\text{т}} = 2210$ кДж/кг; $\tau_{\text{год}} = 4600$ ч; $p_{\text{т}} = 5$ кПа; $\eta_{\text{к.у}} = 0,89$; $\eta_{\text{т.п}} = 0,98$; $Q_{\text{н}}^p = 29\,330$ кДж/кг.

Решение. Количество теплоты, поступающей в тепловую схему турбины от вторичных энергоресурсов,

$$Q_{\text{вэп}} = D_{\text{вэп}} (h_{\text{вэп}} - h'_{\text{доб}}) = \frac{45 \cdot 10^3}{3600} (2650 - 150) = 31\,250 \text{ кВт.}$$

Аналогично решению задачи 3.6

$$y = \frac{h_{\text{от}} - h_{\text{т}}}{h_0 - h_{\text{т}}} = \frac{2780 - 2210}{3480 - 2210} = 0,448;$$

$$k_{\text{с}} = \frac{1}{2} \frac{h'_0 - h'_{\text{т}}}{h_0 - h'_0} = \frac{1}{2} \frac{1510 - 136}{3480 - 1510} = 0,348;$$

$$\xi = y [1 + k_{\text{с}} (1 - y)] = 0,448 [1 + 0,348 (1 - 0,448)] = 0,534.$$

Экономия теплоты на ТЭЦ

$$\Delta Q = \xi Q_{\text{вэп}} = 0,534 \cdot 31\,250 = 16\,687 \text{ кВт.}$$

Экономия топлива за год

$$\Delta B_{\text{год}} = \Delta B_{\text{ч}} \tau_{\text{год}} = \frac{3600 \cdot \Delta Q \tau_{\text{год}}}{Q_{\text{н}}^p \eta_{\text{к.у}} \eta_{\text{т.п}}} = \frac{3600 \cdot 16\,687 \cdot 4600}{29\,330 \cdot 0,89 \cdot 0,98 \cdot 10^3} = 10\,800 \text{ т/год.}$$

Стоимость сэкономленного топлива

$$S_{\text{т}} = B_{\text{год}} \Pi_{\text{т}} = 10\,800 \cdot 39 = 421\,200 \text{ руб/год.}$$

Срок окупаемости сооружения паропровода

$$\tau_{\text{ок}} = K / S_{\text{т}} = 350\,000 / 421\,200 = 0,83 \text{ года.}$$

Срок окупаемости менее одного года следует считать высокоэффективным.

Задача 3.8. Определить срок окупаемости от использования на технологические нужды пара испарительного охлаждения нагревательных печей в количестве $D_{\text{вэп}} = 60$ т/ч. Давление пара от печей $p_{\text{вэп}} = 0,75$ МПа; пар сухой, насыщенный ($x = 1$). Этот пар вытесняет промышленный отбор турбины ПТ-60-130 $h_0 = 3400$ кДж/кг;

$h_{\kappa}=2180$ кДж/кг; $h_{\text{пр}}=2820$ кДж/кг; $\eta_{\kappa,y}=0,87$; $\eta_{\text{т.п}}=0,98$; $Q_{\text{н}}^{\text{р}}=29\,330$ кДж/кг; $h_{\text{доб}}=130$ кДж/кг. Затраты на паропровод от печей до технологических потребителей $K=500$ тыс. руб. Цена замыкающего топлива (условного) $Ц_{\text{т}}=35$ руб/т. Время работы печей в году $\tau_{\text{год}}=6500$ ч.

Ответ: $\tau_{\text{ок}}=0,75$ года.

Задача 3.9. Определить экономию топлива на заводе от использования на нужды отопления отработанного пара после паровых молотов: $D_{\text{в.р}}=25$ т/ч; $p_{\text{в.р}}=0,15$ МПа; пар влажный ($x=0,89$). Отопление завода осуществляется от турбины Т-100-130; $h_0=3480$ кДж/кг; $h_{\text{отб}}=2720$ кДж/кг; $h_{\kappa}=2210$ кДж/кг; $p_{\kappa}=4,0$ кПа; $h'_{\text{доб}}=140$ кДж/кг; $\eta_{\kappa,y}=0,89$; $\eta_{\text{т.п}}=0,98$; $Q_{\text{н}}^{\text{р}}=29\,330$ кДж/кг. Время отопительного сезона $\tau_{\text{от}}=4500$ ч.

Ответ: $\Delta B_{\text{год}}=5950$ т/год.

Задача 3.10. Определить срок окупаемости от использования пара испарительного охлаждения в сетевых подогревателях на ТЭЦ с турбинами Т-25-90. Стоимость сооружения паропровода до ТЭЦ составляет $K=230$ тыс. руб. Количество пара испарительного охлаждения $D_{\text{в.р}}=35$ т/ч; пар сухой, насыщенный; давление на ТЭЦ $p_{\text{в.р}}=p_{\text{отб}}=0,25$ МПа. Начальные параметры ТЭЦ $p_0=9$ МПа; $t_0=510^{\circ}\text{C}$; $h_0=3410$ кДж/кг; $h_{\text{отб}}=2720$ кДж/кг; $h_{\kappa}=2160$ кДж/кг; $p_{\kappa}=4$ кПа. Отопительный период в районе $\tau_{\text{от}}=5200$ ч; стоимость замыкающего топлива (условного) $Ц_{\text{т}}=27$ руб/т; $Q_{\text{н}}^{\text{р}}=29\,330$ кДж/кг; $\eta_{\kappa,y}=0,89$; $\eta_{\text{т.п}}=0,98$.

Ответ: $\tau_{\text{ок}}=1$ год.

Задача 3.11. Определить изменение расхода топлива на ТЭС при включении между двумя регенеративными отборами турбины ПТ-60-130 одноступенчатого испарителя. Производительность испарителя $D_{\text{и}}=12$ т/ч. Давление в отборе, из которого берется греющий пар испарителя, $p_1=0,28$ МПа; $h_1=2730$ кДж/кг; $h_0=3480$ кДж/кг; $h_{\kappa}=2260$ кДж/кг; $p_{\kappa}=4,5$ кПа. Давление в отборе, куда подается вторичный пар испарителя, $p_2=0,15$ МПа; $h_2=2650$ кДж/кг; $p_0=12,7$ МПа; $\eta_{\kappa,y}=0,87$; $\eta_{\text{т.п}}=0,98$; $Q_{\text{н}}^{\text{р}}=29\,330$ кДж/кг.

Решение. Количество теплоты, которое передает испаритель в нижний отбор,

$$Q_{\text{исп}}=D_{\text{исп}}(h_{\text{исп}}-h'_2)=\frac{12 \cdot 10^3}{3600} (2693-467)=7430 \text{ кВт.}$$

Значение $h_{\text{исп}}$ находят по таблицам свойств водяного пара [11] при $p_{\text{исп}}=p_2=0,15$ МПа; $h_{\text{исп}}=2693$ кДж/кг. Там же находят $h'_2=467$ кДж/кг ($t_{0,15}^{\text{н}}=111,6^{\circ}\text{C}$). Находят значения коэффициентов ценности теплоты для верхнего и нижнего отборов:

$$y_1=\frac{h_1-h_{\kappa}}{h_0-h_{\kappa}}=\frac{2730-2260}{2480-2260}=0,386;$$

$$K_c=\frac{1}{2} \frac{h'_0-h'_{\kappa}}{h_0-h'_0}=\frac{1525-130}{2(3480-1525)}=0,357.$$

По таблицам [11] $h'_0=1525$ кДж/кг и $h'_{\kappa}=130$ кДж/кг;

$$\xi_1=y_1[1+K_c(1-y_1)]=0,386[1+0,457(1-0,386)]=0,498;$$

$$y_2 = \frac{h_2 - h_k}{h_0 - h_k} = \frac{2650 - 2260}{3480 - 2260} = 0,319;$$

$$\xi_2 = y_2 [1 + K_c (1 - y_2)] = 0,319 [1 + 0,357 (1 - 0,319)] = 0,397.$$

Изменение расхода теплоты при включении испарителя между верхним и нижним отборами:

$$\Delta Q_{к.у} = (\xi_1 - \xi_2) Q_{исп} = (0,498 - 0,397) \cdot 7430 = 751 \text{ кВт}.$$

Следует определить эффект от включения испарителя, т. е. произойдет ли при этом экономия или перерасход теплоты. Эффект определяется путем логических рассуждений на основе анализа изменений в тепловой схеме. В случае включения испарителя верхний регенеративный отбор будет вытеснять за счет получившегося вторичного пара испарителя нижний регенеративный отбор. Так как пар нижнего отбора срабатывает больший перепад и дает большую мощность на единицу массового расхода рабочего тела, то замена его на верхний отбор приводит к потере экономичности в размере $\Delta Q_{к.у} = 751 \text{ кВт}$, что равноценно перерасходу условного топлива

$$\Delta B = \frac{\Delta Q_{к.у}}{Q_H^p \eta_{к.у} \eta_{т.п}} = \frac{751}{29\,330 \cdot 0,87 \cdot 0,98} = 0,03 \text{ кг/с} = 108,1 \text{ кг/ч}.$$

Задача 3.12. Определить изменение расхода топлива при включении между отборами турбины К-100-90 испарительной установки производительностью $D_{исп} = 2,5 \text{ кг/с}$ при следующих условиях. Давления и энтальпии в отборах $p_1 = 0,608 \text{ МПа}$; $h_1 = 2980 \text{ кДж/кг}$; $p_2 = 0,275 \text{ МПа}$; $h_2 = 2860 \text{ кДж/кг}$; $h_k = 2340 \text{ кДж/кг}$; $p_k = 4,0 \text{ кПа}$; $h_0 = 3442 \text{ кДж/кг}$; $p_0 = 9 \text{ МПа}$; $t_0 = 535^\circ \text{С}$; $\eta_{к.у} = 0,91$; $\eta_{т.п} = 0,98$; $Q_H^p = 29\,330 \text{ кДж/кг}$.

Ответ: Перерасход условного топлива $\Delta B = 76,1 \text{ кг/ч}$.

Задача 3.13. Определить изменение расхода топлива на ТЭЦ с турбиной ПТ-60-130 при включении на промышленный отбор паропреобразователя. Производительность паропреобразователя по вторичному пару $D_{пр} = 35 \text{ т/ч}$. Параметры пара: из отбора с паропреобразователем $p_{пр} = 0,65 \text{ МПа}$; $h_{пр} = 2880 \text{ кДж/кг}$; из отбора без паропреобразователя $p'_{пр} = 0,5 \text{ МПа}$; $h_{пр} = 2832 \text{ кДж/кг}$; вторичного пара паропреобразователя $p_{в.п} = 0,5 \text{ МПа}$; $h_{в.п} = 2748 \text{ кДж/кг}$; свежего пара $p_0 = 12,7 \text{ МПа}$; $h_0 = 3488 \text{ кДж/кг}$; в конденсаторе турбины $p_k = 4 \text{ кПа}$; $h_k = 2310 \text{ кДж/кг}$; $\eta_{к.у} = 0,89$; $\eta_{т.п} = 0,98$; $Q_H^p = 29\,330 \text{ кДж/кг}$; $h_{в.к} = 280 \text{ кДж/кг}$; $\phi_{в.к} = 0,7$; $h'_{х.о.в} = 130 \text{ кДж/кг}$.

Решение. Количество теплоты, передаваемое промышленному потребителю через паропреобразователь,

$$Q_{пр} = D_{пр} (h_{в.п} - h'_{в.к}) = \frac{35 \cdot 10^3}{3600} (2748 - 235) = 24\,432 \text{ кВт},$$

где $h'_{в.к} = \phi_{в.к} h_{в.к} + (1 - \phi_{в.к}) h'_{х.о.в}$ — энтальпия конденсата, возвращаемого в тепловую схему; она учитывает долю возвращаемого от потребителя конденсата $\phi_{в.к}$ с энтальпией $h'_{в.к}$, а также долю $(1 - \phi_{в.к})$ восполнения конденсата химически очищенной водой $h'_{х.о.в}$;

$$h'_{в.к} = 0,7 \cdot 280 + (1 - 0,7) \cdot 130 = 235 \text{ кДж/кг}.$$

Коэффициенты ценности теплоты для промышленного отбора без установки паропреобразователя и с паропреобразователем:

$$\xi_{0,nn} = y_{0,5} [1 + k_c (1 - y_{0,5})] = 0,443 [1 + 0,382 (1 - 0,443)] = 0,537;$$

$$k_c = \frac{1}{2} \cdot \frac{h'_0 - h'_x}{h_0 - h'_0} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1520 - 121,4}{3488 - 1520} = 0,382;$$

$$y_{0,5} = \frac{h_{0,5} - h_x}{h_0 - h_x} = \frac{2832 - 2310}{3488 - 2310} = 0,443;$$

$$y_{0,65} = \frac{2880 - 2310}{3488 - 2310} = 0,483.$$

$$\xi_{nn} = y_{0,65} [1 + k_c (1 - y_{0,65})] = 0,483 [1 + 0,382 (1 - 0,483)] = 0,578.$$

Изменение количества теплоты, подводимой к тепловой схеме при включении в нее паропреобразователя и повышении давления в промышленном отборе с $p_{np}=0,5$ МПа до $p'_{np}=0,65$ МПа,

$$\Delta Q = (\xi_{0,65} - \xi_{0,5}) Q_{np} = (0,578 - 0,537) \cdot 24\,432 = 1000 \text{ кВт};$$

$$\Delta B = \frac{\Delta Q}{Q_n^p \eta_{к.у} \eta_{т.н}} = \frac{100}{29\,330 \cdot 0,89 \cdot 0,98} = 0,0391 \text{ кг/с} = 140,7 \text{ кг/ч.}$$

При включении паропреобразователя получают перерасход теплоты и условного топлива при той же электрической мощности и том же расходе теплоты внешним тепловым потребителям из-за необходимости повышения давления в промышленном отборе турбины.

Задача 3.14. Определить изменение расхода топлива на ТЭЦ с турбиной ПТ-135-130 при выключении паропреобразовательной установки и подаче пара потребителям непосредственно из отбора турбины вследствие осуществления установки по сбору и возврату конденсата на промышленном предприятии. Расход теплоты промышленным потребителем $Q_{np} = 50\,000$ кВт. Начальные параметры перед турбиной $p_0 = 13$ МПа; $t_0 = 560^\circ \text{C}$; конечное давление $p_x = 4$ кПа; $h_x = 2280$ кДж/кг. Давление в промышленном отборе с паропреобразователем $p_{np} = 1,3$ МПа; $h_{np} = 2900$ кДж/кг, без преобразователя $p'_{np} = 1,0$ МПа; $h_{np1} = 2840$ кДж/кг; $Q_n^p = 29\,430$ кДж/кг; $\eta_{к.у} = 0,90$; $\eta_{т.н} = 0,98$.

Ответ: Экономия условного топлива $\Delta B = 0,0792$ кг/с = 279,2 кг/ч.

Задача 3.15. Определить изменение расхода топлива при снижении температурного напора в паропреобразователе, если первоначально он был включен на промышленный отбор $p_{np} = 1,2$ МПа; $h_{np} = 3016$ кДж/кг, а затем вследствие усовершенствований в конструкции и чистке труб от накипи давление в отборе удалось понизить до $p'_{np} = 1,1$ МПа; $h_{np1} = 2993$ кДж/кг; $h_0 = 3480$ кДж/кг = idem; $h_x = 2320$ кДж/кг; $p_x = 4$ кПа; $Q_n^p = 29\,330$ кДж/кг; $\eta_{к.у} = 0,88$; $\eta_{т.н} = 0,98$. Производительность преобразователя $Q_{n/n} = 30$ МВт.

Ответ: Экономия топлива $\Delta B = 0,0237$ кг/с = 85,3 кг/ч.

Задача 3.16. Определить изменение расхода топлива при замене одноступенчатого испарителя на двухступенчатый при той же общей производительности $D_{1н} + D_{2н} = D_n = 20$ т/ч и тех же параметрах отборов $p_1 = 0,28$ МПа; $h_1 = 2750$ кДж/кг; $p_2 = 0,12$ МПа; $h_2 = 2625$ кДж/кг; $h_0 = 3480$ кДж/кг; $p_0 = 12,7$ МПа; $h_x = 2250$ кДж/кг; $p_x = 0,0035$ МПа; $\eta_{к.у} = 0,89$; $\eta_{т.н} = 0,98$; $Q_n^p = 29\,330$ кДж/кг. При установке двух ступеней испарителя они включаются по пару последовательно, а по питатель-

ной воде питаются параллельно, при этом производительности каждой ступени будут примерно равны, следовательно, можно считать при решении задачи, что в нижний отбор поступает из второй ступени испарителя $D_{2н} = 10$ т/ч пара.

Решение. Определяют значения коэффициентов ценности теплоты верхнего и нижнего отбора:

$$y_1 = \frac{h_1 - h_k}{h_0 - h_k} = \frac{2750 - 2250}{3480 - 2250} = 0,407; \quad h'_k = 111,8 \text{ кДж/кг};$$

$$k_c = \frac{1}{2} \frac{h'_0 - h'_k}{h_0 - h'_0} = \frac{1}{2} \frac{1520 - 111,8}{3480 - 1520} = 0,359;$$

$$\xi_1 = y_1 [1 + k_c (1 - y_1)] = 0,407 [1 + 0,359 (1 - 0,407)] = 0,493;$$

$$y_2 = \frac{h_2 - h_k}{h_0 - h_k} = \frac{2625 - 2250}{3480 - 2250} = 0,305;$$

$$\xi_2 = y_2 [1 + k_c (1 - y_2)] = 0,305 [1 + 0,359 (1 - 0,305)] = 0,381.$$

Количество теплоты, передаваемой через испаритель от верхнего отбора к нижнему при одноступенчатой схеме,

$$Q_1 = D_n (h_{2н} - h'_{к.н}) = \frac{20 \cdot 10^3}{3600} (2683,8 - 439,4) = 12 \text{ 500 кВт},$$

где $h_{2н}$ и $h'_{к.н}$ определено по таблицам по давлению $p_2 = 0,12$ МПа для пара и кипящей воды: $h_{2н} = 2683,8$ кДж/кг; $h'_{к.н} = 439,4$ кДж/кг.

При двухступенчатой схеме в нижний отбор поступит теплоты в 2 раза меньше, так как $D_{2н} = 10$ т/ч $= 0,5 D_n$:

$$Q_2 = Q_1 / 2 = 6250 \text{ кВт}.$$

Уменьшение вытеснения верхним отбором нижнего позволит получить экономию теплоты и условного топлива на ТЭЦ:

$$\Delta Q = (\xi_1 - \xi_2) (Q_{од} - Q_{лв}) = (0,493 - 0,381) (12 \text{ 500} - 6250) = 700 \text{ кВт};$$

$$\Delta B = \frac{\Delta Q}{Q_n^p \eta_{к.у} \eta_{т.п}} = \frac{700}{29 \text{ 330} \cdot 0,89 \cdot 0,98} = 0,0274 \text{ кг/с} = 98,6 \text{ кг/ч}.$$

Задача 3.17. Определить изменение расхода топлива при замене одноступенчатого испарителя на двухступенчатый при увеличении общей производительности всей установки с $D_n = 20$ т/ч до $D_{1н} + D_{2н} = 30$ т/ч. Параметры тепловой схемы: $p_0 = 12,7$ МПа; $h_0 = 3480$ кДж/кг; $p_k = 4$ кПа; $h_k = 2310$ кДж/кг. Верхний отбор, куда присоединен испаритель: $p_1 = 0,35$ МПа; $h_1 = 2800$ кДж/кг; нижний отбор: $p_2 = 0,15$ МПа; $h_2 = 2680$ кДж/кг; $\eta_{к.у} = 0,90$; $\eta_{т.п} = 0,98$; $Q_n^p = 29 \text{ 330}$ кДж/кг. При работе двух ступеней испарителя производительности ступеней равны $D_{1н} = D_{2н} = 15$ т/ч.

Ответ: Экономия топлива $\Delta B = 48$ кг/ч.

Задача 3.18. Определить изменение расхода топлива при замене одноступенчатого испарителя на трехступенчатый с сохранением той же производительности установки $D_n = 30$ т/ч при следующих параметрах тепловой схемы: $p_0 = 12,7$ МПа; $h_0 = 3480$ кДж/кг; $p_k = 4$ кПа; $h_k = 2290$ кДж/кг; $p_1 = 0,5$ МПа; $h_1 = 2800$ кДж/кг; $p_2 = 0,15$ МПа; $h_2 = 2635$ кДж/кг; $\eta_{к.у} = 0,89$; $\eta_{т.п} = 0,98$; $Q_n^p = 29 \text{ 330}$ кДж/кг. При трехступен-

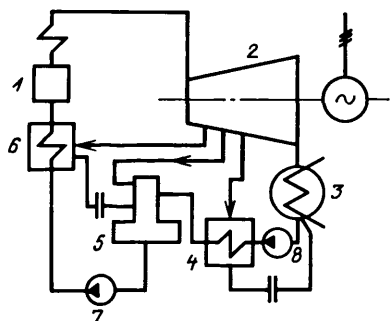


Рис. 3.1. Принципиальная тепловая схема ТЭЦ:

1 — котел; 2 — турбогенератор; 3 — конденсатор; 4 — подогреватель низкого давления (ПНД); 5 — деаэратор; 6 — подогреватель высокого давления (ПВД); 7 — питательный насос; 8 — конденсатный насос

чатой схеме производительность каждой из ступеней одинакова: $D_{1н} = D_{2н} = D_{3н} = 10$ т/ч.

Ответ: Экономия топлива $\Delta B = 193$ кг/ч.

Задача 3.19. Определить изменение тепловой экономичности схемы ТЭЦ (ΔQ и ΔB), если выключился подогреватель высокого давления (ПВД) турбины П-6-35, вследствие чего понизилась температура питательной воды перед котлом с $t_{п.в} = 150^\circ \text{C}$ до $t'_{п.в} = 106^\circ \text{C}$. Расход питательной воды через ПВД $D_{п.в} = 55$ т/ч. Давление и энтальпия свежего пара перед турбиной $p_0 = 4$ МПа; $h_0 = 3284$ кДж/кг; $p_k = 4$ кПа; $h_k = 2360$. Отбор пара на ПВД $p_1 = 0,6$ МПа; $h_1 = 2955$ кДж/кг; отбор пара на деаэратор $p_2 = 0,12$ МПа; $h_2 = 2693$ кДж/кг; $\eta_{к.у} = 0,88$; $\eta_{т.п} = 0,97$; $Q_p^p = 29\,330$ кДж/кг. Мощность турбоустановки после выключения ПВД остается неизменной. Схема представлена на рис. 3.1.

Решение. Количество теплоты, передаваемой питательной воде в ПВД при его работе,

$$Q_{\text{ПВД}} = D_{п.в} c_p (t_{п.в} - t'_{п.в}) = \frac{55 \cdot 10^3}{3600} 4,22 (150 - 106) = 2830 \text{ кВт.}$$

Коэффициент ценности теплоты для отбора пара, подаваемого на ПВД и на деаэратор;

$$y_1 = \frac{h_1 - h_k}{h_0 - h_k} = \frac{2955 - 2360}{3284 - 2360} = 0,644;$$

$$y_2 = \frac{h_2 - h_k}{h_0 - h_k} = \frac{2693 - 2360}{3284 - 2360} = 0,36;$$

$$\xi_1 = y_1 [1 + k_c (1 - y_1)] = 0,644 [1 + 0,217 (1 - 0,644)] = 0,693;$$

$$k_c = \frac{1}{2} \frac{h'_0 - h'_k}{h_0 - h'_0} = \frac{1}{2} \frac{1080 - 121,5}{3284 - 1080} = 0,217;$$

$$\xi_2 = y_2 [1 + k_c (1 - y_2)] = 0,360 [1 + 0,217 (1 - 0,36)] = 0,410.$$

Расход пара на ПВД

$$D_{\text{ПВД}} = \frac{Q_{\text{ПВД}}}{h_1 - h'_1} = \frac{2830}{2955 - 670,4} = \frac{2830}{2284,6} = 1,237 \text{ кг/с,}$$

где h'_1 определено по таблицам при $p_1 = 0,6$ МПа.

Количество теплоты, которое приносит поток конденсата из ПВД в деаэратор,

$$Q_{\text{конд}} = D_{\text{ПВД}} (h'_1 - h'_2) = 1,237 (670,4 - 439,4) \approx 286 \text{ кВт.}$$

Далее определяют изменение расхода теплоты в схеме из-за выключения ПВД. В этом случае подогрев питательной воды будет производиться в экономайзере котла за счет теплоты топлива, имеющей коэффициент ценности $\xi_{\text{к.у}} = 1$, а не паром отбора на ПВД с $\xi_1 = 0,693$. Из-за этого получится перерасход теплоты, так как будет использоваться для подогрева более ценная теплота топлива. Вместе с тем поток конденсата из ПВД не будет поступать в деаэратор и поэтому увеличится второй отбор, имеющий коэффициент ценности теплоты ξ_2 , в отличие от теплоты конденсата первого отбора, который имеет коэффициент ценности теплоты ξ_1 . Это приведет к небольшой экономии теплоты. В целом получается перерасход теплоты при выключении ПВД

$$\Delta Q_{\text{к.у}} = (\xi_{\text{к.у}} - \xi_1) Q_{\text{ПВД}} - (\xi_1 - \xi_2) Q_{\text{конд}} = (1 - 0,693) \cdot 2830 - (0,693 - 0,410) \cdot 286 = 869 - 80,9 = 788,1 \text{ кВт.}$$

Перерасход топлива в результате выключения ПВД

$$\Delta B = \frac{\Delta Q_{\text{к.у}}}{Q_{\text{н}}^{\text{р}} \eta_{\text{к.у}} \eta_{\text{т.п}}} = \frac{788,1}{29 \ 330 \cdot 0,88 \cdot 0,97} = 0,0315 \text{ кг/с} = 113,4 \text{ кг/ч.}$$

Задача 3.20. Определить изменение расхода топлива при выключении из работы ПВД, работающего на первом отборе, при следующих параметрах тепловой схемы: $p_0 = 3,43 \text{ МПа}$; $h_0 = 3288 \text{ кДж/кг}$; $t_{\text{н.в}} = 152^\circ \text{С}$; $p_1 = 0,58 \text{ МПа}$; $h_1 = 2950 \text{ кДж/кг}$; $p_2 = 0,15 \text{ МПа}$; $h_2 = 2712 \text{ кДж/кг}$; $D_{\text{н.в}} = 115 \text{ т/ч}$; $p_{\text{к}} = 4 \text{ кПа}$; $h_{\text{к}} = 2312 \text{ кДж/кг}$; $Q_{\text{н}}^{\text{р}} = 29 \ 330 \text{ кДж/кг}$; $\eta_{\text{к.у}} = 0,89$; $\eta_{\text{т.п}} = 0,98$. Мощность турбогенератора при выключении ПВД не изменятся $N_{\text{г}} = \text{idem}$. Фрагмент тепловой схемы турбоустановки представлен на рис. 3.1.

Ответ: Перерасход топлива $\Delta B = 233 \text{ кг/ч}$.

Задача 3.21. Определить изменение расхода топлива при включении в работу дополнительно еще одного ПВД, повышающего температуру питательной воды перед котлом с $t_{\text{н.в}} = 150^\circ \text{С}$ до $t'_{\text{н.в}} = 180^\circ \text{С}$ за счет использования промышленного отбора давлением $p_{\text{нр}} = 1,2 \text{ МПа}$; $h_{\text{нр}} = 2975 \text{ кДж/кг}$; $h_0 = 3420 \text{ кДж/кг}$; $p_0 = 9 \text{ МПа}$; $p_{\text{к}} = 4 \text{ кПа}$; $h_{\text{к}} = 2325 \text{ кДж/кг}$; на ПВД применены опускные насосы для откачки конденсата. Схема приведена на рис. 3.2. $Q_{\text{н}}^{\text{р}} = 29 \ 330 \text{ кДж/кг}$; $\eta_{\text{к.у}} = 0,89$; $\eta_{\text{т.п}} = 0,98$; $D_{\text{н.в}} = 100 \text{ кг/с}$.

Ответ: Экономия условного топлива $\Delta B = 665 \text{ кг/ч}$.

Задача 3.22. Определить изменение расхода топлива при замене каскадного слива конденсата греющего пара в ПНД на подъемные насосы. Схема включения ПНД представлена на рис. 3.3. Основные параметры схемы: $p_0 = 12 \text{ МПа}$; $h_0 = 3482 \text{ кДж/кг}$; $h_4 = 2792 \text{ кДж/кг}$; $p_4 = 0,2 \text{ МПа}$; $h_5 = 2686 \text{ кДж/кг}$; $p_5 = 0,1 \text{ МПа}$; $h_{\text{к}} = 2320 \text{ кДж/кг}$; $p_{\text{к}} = 4 \text{ кПа}$; $D_{\text{к}} = 50 \text{ кг/с}$; $t_{\text{н.в}} = 230^\circ \text{С}$; $p_{\text{н.в}} = 18 \text{ МПа}$; $\eta_{\text{к.у}} = 0,89$; $\eta_{\text{т.п}} = 0,98$; $Q_{\text{н}}^{\text{р}} = 29 \ 330 \text{ кДж/кг}$.

Решение. Находят коэффициенты ценности теплоты по формулам эксергетического анализа [14]:

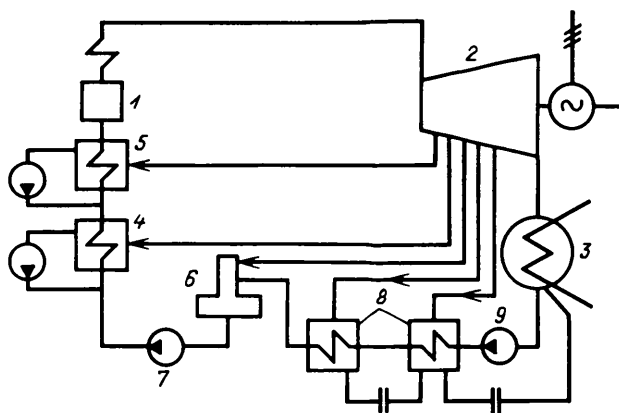


Рис. 3.2. Принципиальная схема установки с включением дополнительного (второго) ПВД:

1 — котел; 2 — турбогенератор; 3 — конденсатор; 4 — ПВД1; 5 — ПВД2 (дополнительный); 6 — деаэрактор; 7 — питательный насос; 8 — ПВД; 9 — конденсатный насос

$$\xi_4 = \bar{\omega}_4 = \frac{\omega_4}{\omega_0} = \left[\left(1 - \frac{T_{o.c.}}{T_4} \right) \eta_{zi} \right] / \left[\left(1 - \frac{T_{o.c.}}{T_0^{cp}} \right) \eta_{zc} \right],$$

где $T_0^{cp} = (h_0 - h'_{п.в}) / (s_0 - s_{п.в})$; здесь s_0 , $s_{п.в}$ и $h'_{п.в}$ находят по h , s -диаграмме и таблицам свойств водяного пара: $s_0 = 6,622$ кДж/(кг · К); $s_{п.в} = 2,581$; $h'_{п.в} = 993,9$ кДж/кг; $\eta_{zi} = \eta_{zc}$ — внутренние эксергетические КПД проточной части турбины.

$$T_0^{cp} = \frac{h_0 - h'_{п.в}}{s_0 - s_{п.в}} = \frac{3482 - 993,9}{6,622 - 2,581} = 618,5 \text{ К};$$

$\omega_0 = 1 - \frac{T_k}{T_0^{cp}} = 1 - \frac{293,15}{618,5} = 0,526$; T_4 и T_5 находят по таблицам (по p_4 и p_5); $T_5 = 372,7$ К; $T_4 = 393,4$; $s_4 = 7,33$; $s_5 = 7,42$; $s'_4 = 1,53$; $s'_5 = 1,303$ кДж/(кг · К);

$$\omega_4 = 1 - \frac{T_{o.c.}(s_4 - s'_4)}{h_4 - h'_4} = 1 - \frac{293,15(7,33 - 1,53)}{2782 - 504,7} = 0,254;$$

$$\omega_5 = 1 - \frac{T_{o.c.}(s_5 - s'_5)}{h_5 - h'_5} = 1 - \frac{293,15(7,42 - 1,303)}{2685 - 417,5} = 0,219;$$

$$\xi_5 = \frac{\omega_5}{\omega_0} = 0,416; \quad \xi_4 = \frac{\omega_4}{\omega_0} = 0,483.$$

При установке подъемных насосов повышается тепловая экономичность схемы, так как не будет вытеснения пятого отбора за счет теплоты конденсата четвертого отбора, а также не будет потерь теплоты в конденсаторе турбины за счет охлаждения конденсата четвертого и пятого отборов в конденсаторе. Таким образом, схема с подъемными насосами экономичнее схемы с каскадным сливом. Эта экономия теплоты составит

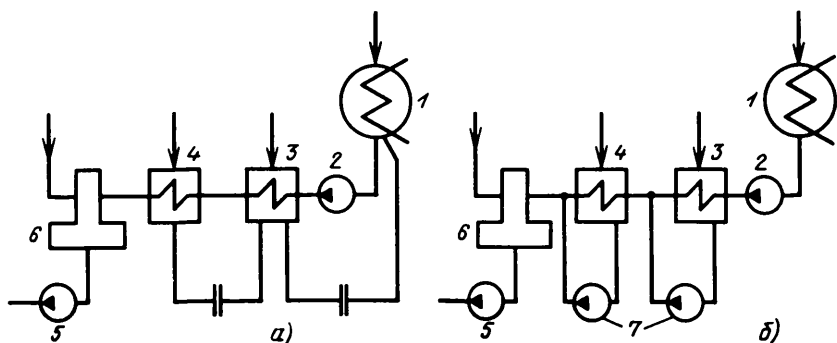


Рис. 3.3. Схема с заменой каскадного слива конденсата пара из ПНД (а) на подъемные насосы (б):

1—конденсатор; 2—конденсатный насос; 3—ПНД1; 4—ПНД2; 5—питательный насос; 6—деаэрация; 7—подъемные насосы

$$\Delta Q = (\xi_4 - \xi_5) D_4 (h'_{отб\ 4} - h'_{отб\ 5}) + (\xi_5 - \xi_k) (D_4 + D_5) (h'_{отб\ 5} - h'_k).$$

Первый член формулы определяет экономию от прекращения слива конденсата D_4 из ПНД2 в ПНД1, вследствие чего увеличивается отбор D_5 более низкого давления ($p_4 > p_5$). Второй член — экономия от прекращения слива конденсата из ПНД1 ($D_4 + D_5$) в конденсатор, где он охлаждался от h'_5 до h'_k , что и приводит к экономии теплоты в схеме. Значения D_4 и D_5 находят по балансу теплоты ПНД2 и ПНД1 и заданному расходу конденсата $D_k = 50$ кг/с.

Уравнения тепловых балансов ПНД4 и ПНД5 при недогреве конденсата до температуры насыщения греющего пара в ПНД $\theta = 5^\circ \text{C}$ имеют вид

$$D_4 = \frac{(D_k + D_4 + D_5)(h'_4 - h'_5)}{(h_{отб\ 4} - h'_{отб\ 4}) \cdot 0,98} = \frac{(50 + D_4 + D_5)(484 - 398)}{(2782 - 504,7) \cdot 0,98},$$

$$D_5 = \frac{(D_k + D_4 + D_5)(h'_5 - h'_k) - D_4(h'_{отб\ 4} - h'_{отб\ 5})}{(h_{отб\ 5} - h'_{отб\ 5}) \cdot 0,98} =$$

$$= \frac{(50 + D_4 + D_5)(398 - 119,8) - D_4(504,7 - 417,5)}{(2685 - 417,5) \cdot 0,98}.$$

Решение системы двух уравнений приводит к следующим результатам: $D_5 = 7,56$ кг/с; $D_4 = 2,3$ кг/с.

Экономия теплоты от замены каскадного слива конденсата в ПНД на подъемные насосы

$$\Delta Q = (0,482 - 0,416) \cdot 2,3(504,7 - 417,5) +$$

$$+ (0,416 - 0)(2,3 + 7,56)(417,5 - 119,8) = 1234,5 \text{ кВт}.$$

Оценка экономичности выполнена без учета затраты мощности на привод подъемных насосов, которая составит около 20 кВт (для двух насосов).

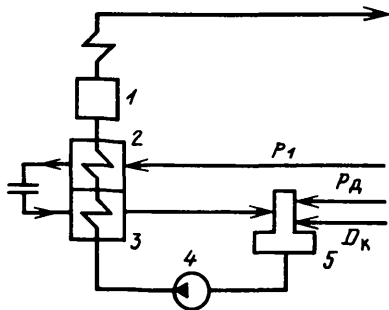


Рис. 3.4. Схема установки охладителя конденсата за ПВД:

1 — котел; 2 — ПВД; 3 — охладитель конденсата, установленный дополнительно за ПВД; 4 — питательный насос; 5 — деаэратор

Задача 3.23. Определить изменение экономичности тепловой схемы от установки на подогреватель высокого давления охладителя конденсата греющего пара при каскадном сливе его в деаэратор. Схема на рис. 3.4 имеет

следующие параметры: $p_0 = 3,5$ МПа; $t_0 = 435^\circ \text{C}$ ($h_0 = 3303$ кДж/кг); $p_1 = 0,6$ МПа; $h_1 = 2920$ кДж/кг; $p_d = 0,15$ МПа; $s_0 = 6,959$ кДж/(кг · К); $h_d = 2710$ кДж/кг; $p_k = 4,0$ кПа; $h_k = 2315$ кДж/кг; $D_{п.в} = 12$ кг/с; $Q_H^p = 29330$ кДж/кг; $t_{п.в} = 150^\circ \text{C}$; $p_{п.в} = 4,5$ МПа; $\eta_{к.у} = 0,90$; $\eta_{т.п} = 0,98$; $\eta_{эм} = 0,97$; КПД теплообменного аппарата $\eta_{т.а} = 0,98$. В охладителе температура конденсата снижается на 20°C ($\Delta t_{охл} = 20^\circ \text{C}$).

Решение. Находят по таблицам $h'_{п.в} = 634,6$ кДж/кг; $s_{п.в} = 1,837$ кДж/(кг · К); $h'_1 = 670,4$ кДж/кг; $h'_d = 467,1$ кДж/кг.

Расход пара на ПВД из первого отбора

$$D_1 = \frac{(h'_{п.в} - h'_d) D_{п.в}}{(h_1 - h'_1) \eta_{т.а}} = \frac{(634,6 - 467,1) \cdot 12}{(2920 - 679,4) \cdot 0,98} = 0,912 \text{ кг/с.}$$

Количество теплоты, передаваемой конденсатом питательной воде,

$$Q_{охл} = D_1 c_p \Delta t_{охл} = 0,912 \cdot 4,2 \cdot 20 = 76,6 \text{ кВт.}$$

Находят по методике, приведенной в задаче 3.22, значения коэффициентов ценности теплоты в первом отборе и в деаэраторе:

$$T_0^{cp} = \frac{h_0 - h_{п.в}}{s_0 - s_{п.в}} = \frac{3303 - 634,6}{6,959 - 1,837} = 520,9 \text{ К;}$$

$$\omega_0 = 1 - \frac{T_{о.с}}{T_0^{cp}} = 1 - \frac{293,15}{520,9} = 0,4373;$$

$$\omega_1 = 1 - \frac{T_{о.с}(s_1 - s'_k)}{h_1 - h'_1} = 1 - \frac{293,15(7,15 - 1,930)}{2920 - 670,4} = 0,320;$$

$$\omega_d = 1 - \frac{T_{о.с}(s_d - s'_d)}{h_d - h'_d} = 1 - \frac{293(7,21 - 1,434)}{2710 - 467,1} = 0,245;$$

$$\xi_1 = \frac{\omega_1}{\omega_0} = 0,732; \quad \xi_d = \frac{\omega_d}{\omega_0} = \frac{0,245}{0,437} = 0,56.$$

При установке и включении в работу охладителя конденсата теплота конденсата первого отбора будет значительно меньше вытеснять отбор более низкого давления (отбор Д), поступающий в деаэратор, вследствие чего увеличится комбинированная выработка на базе регенеративного подогрева конденсата турбин и появится экономия теплоты в схеме:

$$\Delta Q = (\xi_1 - \xi_d) Q_{\text{окл}} = (\xi_1 - \xi_d) D_1 c_p \Delta t_{\text{окл}} = \\ = (0,732 - 0,56) \cdot 76,6 = 13,17 \text{ кДж/кг} = 13,17 \text{ кВт}.$$

Задача 3.24. Определить изменение расхода теплоты в тепловой схеме (рис. 3.4) при замене каскадного слива конденсата на двух ПНД на подъемные насосы при следующих параметрах тепловой схемы: $p_0 = 9 \text{ МПа}$; $h_0 = 3450 \text{ кДж/кг}$; $p_k = 4 \text{ кПа}$; $h_k = 2320 \text{ кДж/кг}$ ($t_k = 29^\circ \text{ С}$); $p_1 = 0,2 \text{ МПа}$; $h_1 = 2750 \text{ кДж/кг}$; $p_2 = 0,07 \text{ МПа}$; $h_2 = 2640 \text{ кДж/кг}$; $D_{\text{конд}} = 14 \text{ кг/с}$; $\theta = 4^\circ \text{ С}$; $t_{\text{п.в}} = 160^\circ \text{ С}$; $p_{\text{п.в}} = 12 \text{ МПа}$; $Q_{\text{п}}^p = 29330 \text{ кДж/кг}$; $\eta_{\text{к.у}} = 0,9$; $\eta_{\text{т.п}} = 0,98$; $\eta_{\Sigma} = 0,97$.

Ответ: Экономия теплоты $\Delta Q = 235 \text{ кВт}$.

Задача 3.25. Определить изменение расхода теплоты и топлива в схеме при установке на двух ПВД охладителей конденсата при каскадном сливе конденсата греющего пара из ПВД в деаэратор при следующих параметрах схемы: $p_0 = 8,8 \text{ МПа}$; $t_0 = 530^\circ \text{ С}$; ($h_0 = 3463$; $s_0 = 6,766 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$); $p_1 = 2,65 \text{ МПа}$; $h_1 = 3220 \text{ кДж/кг}$; $p_2 = 1,4 \text{ МПа}$; $h_2 = 3088 \text{ кДж/кг}$; $p_3 = 0,6 \text{ МПа}$; $h_3 = 2890 \text{ кДж/кг}$; $\eta_{\text{к.у}} = 0,89$; $\eta_{\text{т.п}} = 0,98$; $\eta_{\Sigma} = 0,97$; $Q_{\text{п}}^p = 29330 \text{ кДж/кг}$; недогрев в ПВД питательной воды $\theta = 5^\circ \text{ С}$; разность температур на выходе из охладителя конденсата составляет $\Delta t = 10^\circ \text{ С}$. Расход питательной воды через ПВД $D_{\text{п.в}} = 120 \text{ кг/с}$.

Ответ: Экономия топлива $\Delta B = 0,12 \text{ кг/с}$.

Задача 3.26. Определить эксергетический КПД барабанного котла, работающего на ТЭЦ при следующих условиях: $D_{\text{п.в}} = 230 \text{ т/ч}$; расход пара из котла $D_{\text{пс}} = 210 \text{ т/ч}$; $p_{\text{п.в}} = 16 \text{ МПа}$; $t_{\text{п.в}} = 225^\circ \text{ С}$; $p_{\text{пс}} = 14 \text{ МПа}$; $t_{\text{пс}} = 560^\circ \text{ С}$ (перегретый пар на выходе из пароперегревателя); $Q_{\text{п}}^p = 29330 \text{ кДж/кг}$; $\eta_{\text{к.у}} = 0,89$. Эксергия топлива $e_{\text{т}} = 1,1 Q_{\text{п}}^p$; температура окружающей среды $t_{0,\text{с}} = 20^\circ \text{ С}$.

Решение. Эксергетический КПД котла определяется по потокам эксергии входящих и выходящих из него

$$\eta_{\text{с}} = \frac{D_{\text{пс}} e_{\text{пс}} + D_{\text{прод}} e_{\text{прод}} - D_{\text{п.в}} e_{\text{п.в}}}{B e_{\text{т}}}.$$

Расход топлива определяется по тепловому балансу котла по энтальпиям входящих и выходящих потоков

$$B = \frac{D_{\text{пс}} h_{\text{пс}} + D_{\text{прод}} h'_6 - D_{\text{п.в}} h_{\text{п.в}}}{Q_{\text{п}}^p \eta_{\text{к.у}}}.$$

Находят $D_{\text{прод}} = D_{\text{п.в}} - D_{\text{пс}} = 230 - 210 = 20 \text{ т/ч}$.

Находят по таблицам энтальпию кипящей воды при давлении в барабане котла $p_{\text{п.в}} = 16 \text{ МПа}$; $h'_6 = 1651 \text{ кДж/кг}$; $h_{\text{п.в}} = 970,6 \text{ кДж/кг}$ (по $t_{\text{п.в}} = 225^\circ \text{ С}$ и $p_{\text{п.в}} = 18 \text{ МПа}$); $h_{\text{пс}} = 3485,8 \text{ кДж/кг}$ (по $t_{\text{пс}} = 560^\circ \text{ С}$; $p_{\text{пс}} = 14 \text{ МПа}$).

Подставляют найденные значения $D_{\text{прод}}$ и h'_6 в формулу

$$B = \frac{210 \cdot 10^3 \cdot 3485,8 + 20 \cdot 10^3 \cdot 1651 - 230 \cdot 10^3 \cdot 970,6}{29330 \cdot 0,89} = \\ = 20,76 \text{ т/ч} = 5,76 \text{ кг/с}.$$

Эксергии потоков пара, продувки и питательной воды:

$$E_{\text{пс}} = D_{\text{пс}} [h_{\text{пс}} - h_{0, \text{с}} - T_{0, \text{с}} (s_{\text{пс}} - s_{0, \text{с}})] = \frac{230 \cdot 10^3}{3600} 3485,8 -$$

$$- 83,8 - 293 (6,595 - 0,297) = 90\,825 \text{ кВт};$$

$$E_{\text{прод}} = D_{\text{прод}} [h_{\text{прод}} - h_{0, \text{с}} - T_{0, \text{с}} (s_{\text{прод}} - s_{0, \text{с}})] = \\ = \frac{20 \cdot 10^3}{3600} [1651 - 83,8 - 293 (3,748 - 0,29)] = 3090 \text{ кВт};$$

$$E_{\text{п.в}} = D_{\text{п.в}} [h_{\text{п.в}} - h_{0, \text{с}} - T_{0, \text{с}} (s_{\text{п.в}} - s_{0, \text{с}})] = \\ = \frac{230 \cdot 10^3}{3600} [970,6 - 83,8 - 293 (2,585 - 0,297)] = 13\,827 \text{ кВт};$$

$$\eta_{\text{с}} = \frac{E_{\text{пс}} + E_{\text{прод}} - E_{\text{п.в}}}{Be_{\text{т}}} = \frac{90\,825 + 3090 - 13\,827}{5,76 \cdot 1,1 \cdot 29\,330} = 0,431.$$

Задача 3.27. Определить эксергетический КПД котла при следующих условиях: котел прямоточный; расход перегретого пара $D_{\text{пс}} = 930 \text{ т/ч}$; $p_{\text{к.у}} = 14 \text{ МПа}$; $t_{\text{к.у}} = 555^\circ \text{С}$; $D_{\text{п.в}} = D_{\text{пс}}$; $t_{\text{п.в}} = 260^\circ \text{С}$; $p_{\text{п.в}} = 17 \text{ МПа}$; $e_{\text{т}} = 1,15 Q_{\text{н}}^{\text{р}}$; $Q_{\text{н}}^{\text{р}} = 29\,330 \text{ кДж/кг}$; $\eta_{\text{к.у}} = 0,91$; $t_{0, \text{с}} = 20^\circ \text{С}$.

Ответ: $\eta_{\text{с}} = 0,44$.

Задача 3.28. Определить эксергетический КПД барабанного котла при следующих условиях: $D_{\text{пс}} = 420 \text{ т/ч}$; $p_{\text{пс}} = 10 \text{ МПа}$; $t_{\text{пс}} = 540^\circ \text{С}$; $D_{\text{прод}} = 5 \text{ т/ч}$; $p_6 = 12 \text{ МПа}$; $t_{\text{п.в}} = 215^\circ \text{С}$; $p_{\text{п.в}} = 13 \text{ МПа}$; $e_{\text{т}} = 1,05 Q_{\text{н}}^{\text{р}}$; $Q_{\text{н}}^{\text{р}} = 24\,500 \text{ кДж/кг}$; $\eta_{\text{к.у}} = 0,88$; $t_{0, \text{с}} = 20^\circ \text{С}$.

Ответ: $\eta_{\text{с}} = 0,42$.

Задача 3.29. Определить эксергетический КПД прямоточного котла при следующих условиях работы: $D_{\text{пс}} = 1800 \text{ т/ч}$; $p_{\text{пс}} = 24,5 \text{ МПа}$; $t_{\text{пс}} = 545^\circ \text{С}$; пар вторичного перегрева: $D_{\text{вт}} = D_{\text{пс}}$; $\Delta h_{\text{вт}} = 640 \text{ кДж/кг}$; $p_{\text{вт}} = 12 \text{ МПа}$; $\eta_{0, \text{т}} = 0,90$; $D_{\text{пс}} = D_{\text{пв}}$; $h'_{\text{пв}} = 1100 \text{ кДж/кг}$; $p_{\text{п.в}} = 30 \text{ МПа}$; $e_{\text{т}} = 1,1 Q_{\text{н}}^{\text{р}}$; $Q_{\text{н}}^{\text{р}} = 29\,330 \text{ кДж/кг}$; $\eta_{\text{к.у}} = 0,90$; $t_{0, \text{с}} = 20^\circ \text{С}$.

Ответ: $\eta_{\text{с}} = 0,45$.

Задача 3.30. Определить эксергетический КПД прямоточного котла при следующих условиях работы: $p_{\text{к.у}} = 10 \text{ МПа}$; $t_{\text{п}} = 540^\circ \text{С}$; $p_{\text{п.в}} = 12 \text{ МПа}$; $t_{\text{п.в}} = 215^\circ \text{С}$; $D_{\text{п.в}} = D_{\text{пс}} = 410 \text{ т/ч}$; $\eta_{\text{к.у}} = 0,89$; $e_{\text{т}} = 30\,500 \text{ кДж/кг}$; $t_{0, \text{с}} = 20^\circ \text{С}$.

Ответ: $\eta_{\text{с}} = 0,425$.

Задача 3.31. Определить эксергетические потери и КПД паропреобразователя при следующих условиях работы: греющий пар промышленного отбора: $p_{\text{пр}} = 1,5 \text{ МПа}$; $h_{\text{пр}} = 3010 \text{ кДж/кг}$ и расходом $D_{\text{пр}} = 35 \text{ т/ч}$; конденсат греющего пара не переохлаждается; вторичный пар паропреобразователя имеет давление $p_{\text{вт.п}} = 1,3 \text{ МПа}$ (пар сухой насыщенный). Питательная вода паропреобразователя имеет давление $p_{\text{п.в}} = 1,3 \text{ МПа}$ и температуру $t_{\text{п.в}} = 104^\circ \text{С}$. Расход продувочной воды $D_{\text{прод}}$ равен 0,1 производительности паропреобразователя $D_{\text{вт}}$; КПД паропреобразователя $\eta_{\text{т.а}} = 0,98$; $t_{0, \text{с}} = 20^\circ \text{С}$.

Решение. Находят по таблицам свойств водяного пара энтальпию вторичного пара $h_{\text{вт}} = h'_{\text{вт}} = 2786 \text{ кДж/кг}$; $h'_{\text{вт}} = 814,7 \text{ кДж/кг}$; $s'_{\text{вт}} = 6,493 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$; $s'_{\text{вт}} = 2,251 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$, $h_{\text{п.в}} = 436 \text{ кДж/кг}$; $h'_{\text{пр}} = 844,6 \text{ кДж/кг}$; $s'_{\text{пр}} = 2,314 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$; $s_{\text{пр}} = 6,88 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$.

Составляют тепловой баланс паропреобразователя:

$$\eta_{т.а} D_{пр} h_{пр} + D_{п.в} h_{п.в} = \eta_{т.а} D_{пр} h'_{пр} + D_{вт} h_{вт} + 0,1 D_{вт} h'_{вт}.$$

Из уравнения теплового баланса находят расход вторичного пара $D_{вт}$ при указанном в задаче условии, что $D_{пр} = 35$ т/ч, а $D_{п.в} = D_{вт} + 0,1 D_{вт} = 1,1 D_{вт}$:

$$D_{вт} = \frac{D_{пр} (h_{пр} - h'_{пр}) \eta_{т.а}}{h_{вт} + 0,1 h_{вт} - 1,1 h_{п.в}} = \frac{35 \cdot 10^3 (3010 - 844,6) \cdot 0,98}{3600 \cdot (2786 + 0,1 \cdot 814,7 - 1,1 \cdot 436)} = 8,63 \text{ кг/с}.$$

Находят значения $D_{п.в}$ и $D_{прод}$ по известному $D_{вт}$:

$$D_{п.в} = D_{вт} + D_{прод} = 1,1 D_{вт} = 1,1 \cdot 8,63 = 9,49 \text{ кг/с};$$

$$D_{прод} = 0,1 D_{вт} = 0,1 \cdot 8,63 = 0,863 \text{ кг/с}.$$

Находят значения эксергии для потоков рабочего тела в паропреобразователе. Эксергия греющего пара отбора $D_{пр} = 9,72$ кДж/с:

$$\begin{aligned} E_{пр} &= D_{пр} [h_{пр} - h_{о.с} - T_{о.с} (s_{пр} - s_{о.с})] = \\ &= 9,72 [3010 - 83,8 - 293 (6,88 - 0,293)] = 9683 \text{ кДж/с} = 9683 \text{ кВт}. \end{aligned}$$

Эксергия конденсата греющего пара

$$\begin{aligned} E_{конд} &= D_{пр} [h'_{пр} - h_{о.с} - T_{о.с} (s'_{пр} - s_{о.с})] = \\ &= 9,72 [844,6 - 83,8 - 293 (2,314 - 0,293)] = 1632 \text{ кВт}. \end{aligned}$$

Эксергия вторичного пара паропреобразователя

$$\begin{aligned} E_{вт} &= D_{вт} [h_{вт} - h_{о.с} - T_{о.с} (s_{вт} - s_{о.с})] = \\ &= 8,63 [2786 - 83,8 - 293 (6,493 - 0,293)] = 7646 \text{ кВт}. \end{aligned}$$

Эксергия питательной воды, поступающей в паропреобразователь,

$$\begin{aligned} E_{п.в} &= D_{п.в} [h'_{п.в} - h_{о.с} - T_{о.с} (s_{п.в} - s_{о.с})] = \\ &= 9,49 [436 - 83,8 - 293 (1,35 - 0,293)] = 403 \text{ кВт}, \end{aligned}$$

где $h'_{п.в}$ находят по таблицам при $p_{п.в} = 1,3$ МПа и $t_{п.в} = 104^\circ \text{C}$; $s_{п.в} = 1,35$ кДж/(кг · К).

Эксергия продувочной воды, уходящей из паропреобразователя,

$$\begin{aligned} E_{прод} &= D_{прод} [h'_{вт} - h_{о.с} - T_{о.с} (s'_{вт} - s_{о.с})] = \\ &= 0,863 [814,7 - 83,8 - 293 (2,251 - 0,293)] = 135 \text{ кВт}. \end{aligned}$$

На основе найденных значений эксергий составляют эксергетический баланс паропреобразовательной установки, как равенство суммы эксергий входящих потоков, суммы эксергий выходящих потоков и суммы потерь эксергии:

$$\sum E_{вх} = \sum E_{вых} + \sum E_{пот};$$

отсюда находят $\sum E_{пот} = \sum E_{вх} - \sum E_{вых}$

$$\eta_c = \frac{\sum E_{вых}}{\sum E_{вх}} = 1 - \frac{\sum E_{пот}}{\sum E_{вх}} = \frac{9413}{10086} = 0,933;$$

$$\sum E_{вх} = E_{пр} + E_{п.в} = 8807 + 366 = 10086 \text{ кВт};$$

$$\sum E_{\text{вых}} = E_{\text{конд}} + E_{\text{вт}} + E_{\text{прод}} = 1632 + 7646 + 135 = 9413 \text{ кВт.}$$

Потери эксергии в паропреобразователе

$$\sum E_{\text{пот}} = \sum E_{\text{вх}} - \sum E_{\text{вых}} = 10\,086 - 9413 = 673 \text{ кВт,}$$

или

$$\frac{\sum E_{\text{пот}} \cdot 100\%}{\sum E_{\text{вх}}} = \frac{673 \cdot 100\%}{10\,086} = 6,7\%.$$

Задача 3.32. Определить эксергетический КПД пароводяного теплообменника при следующих условиях его работы: греющий пар давлением $p_{\text{гр}} = 0,2$ МПа; $h_{\text{гр}} = 2720$ кДж/кг; конденсат пара не переохлаждается. Нагреваемая среда — вода: $G_{\text{н}} = 80$ т/ч; давление $p_{\text{н}} = 0,5$ МПа; $t_1 = 115^\circ \text{C}$; $t_2 = 70^\circ \text{C}$; потеря теплоты поверхностью учитывается КПД теплообменника $\eta_{\text{т.а}} = 0,98$.

Ответ: $\eta_{\text{с}} = 0,95$.

Задача 3.33. Определить эксергетический КПД водо-водяного теплообменника при следующих условиях работы: греющая среда — сетевая вода; $G_{\text{с}} = 12,5$ т/ч; давление $p_{\text{с}} = 0,7$ МПа; $t_1 = 105^\circ \text{C}$, нагреваемая среда — водопроводная вода при давлении $p_{\text{н}} = 0,3$ МПа, ее расход $G_{\text{н}} = 15$ т/ч; $t_{\text{вх}} = 25^\circ \text{C}$; $t_{\text{вых}} = 60^\circ \text{C}$; потеря теплоты поверхностью теплообменника $\eta_{\text{т.а}} = 0,98$.

Ответ: $\eta_{\text{с}} = 0,85$.

Глава четвертая

ТЕПЛОПОДГОТОВИТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ТЕПЛОВЫХ СХЕМ ТЭЦ И МЕТОДЫ ИХ РАСЧЕТА

Задача 4.1. Определить расход пара в поверхностном пароводяном теплообменнике для подогрева сетевой воды с $t_0 = 50^\circ \text{C}$ до $t_{\text{н}} = 120^\circ \text{C}$. Расход сетевой воды $W_{\text{с.в}} = 480$ т/ч. Параметры пара в отборе $p_{\text{отб}} = 0,25$ МПа; $t_{\text{отб}} = 200^\circ \text{C}$. Конденсат пара не переохлаждается.

Решение. Уравнение теплового баланса подогревателя: $D_{\text{отб}}(h_{\text{отб}} - h'_{\text{отб}})\eta_{\text{т.а}} = W_{\text{с.в}}(t_{\text{н}} - t_0)c_p$. По таблицам свойств воды и водяного пара или с помощью h , s -диаграммы находим

$$h_{\text{отб}} = 2870 \text{ кДж/кг; } h'_{\text{отб}} = 127,4 \text{ кДж/кг;}$$

$$D_{\text{отб}} = \frac{480(120 - 50) \cdot 4,19}{(2870 - 127,4) \cdot 0,98} = 52,38 \text{ т/ч.}$$

Задача 4.2. Рассчитать двухступенчатую сетевую подогревательную установку (рис. 4.1). Исходные данные: тепловая нагрузка сетевой подогревательной установки $Q_{\text{с.п}} = 50$ МВт; давление греющего пара в верхнем сетевом подогревателе $p_{\text{с.п}2} = 0,25$ МПа; $t_{\text{с.п}2} = 200^\circ \text{C}$; параметры пара в нижнем сетевом подогревателе $p_{\text{с.п}1} = 0,1$ МПа;

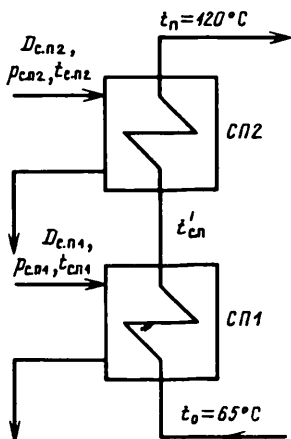


Рис. 4.1. Двухступенчатая сетевая подогривательная установка:

СП1 — сетевой подогреватель первой ступени; СП2 — сетевой подогреватель второй ступени

$t_{c.n1} = 120^\circ \text{C}$; температура подающей сетевой воды $t_n = 120^\circ \text{C}$, обратной сетевой воды $t_o = 65^\circ \text{C}$. Конденсат пара не переохлаждается.

Решение. Расход сетевой воды

$$W_{c.в} = \frac{Q_{c.n}}{h'_n - h'_o} \approx \frac{Q_{c.n}}{(t_n - t_o) c_p} = \frac{50 \cdot 10^3}{(120 - 65) \cdot 4,19} = 217,0 \text{ кг/с} = 781 \text{ т/ч.}$$

Принимая недогрев сетевой воды до температуры насыщения в нижнем сетевом подогревателе $\theta = 5^\circ \text{C}$, определяем температуру сетевой воды за нижним сетевым подогревателем:

$$t'_{c.n1} = t_{c.n1}^n - \theta = 100 - 5 = 95^\circ \text{C.}$$

Тепловые нагрузки сетевых подогревателей:

$$Q_{c.n1} = W_{c.в} (t'_{c.n1} - t_o) C_p = 217 (95 - 65) \cdot 4,19 \cdot 10^{-3} = 27,27 \text{ МВт};$$

$$Q_{c.n2} = W_{c.в} (t_n - t'_{c.n1}) C_p = 217 (120 - 95) \cdot 4,19 \cdot 10^{-3} = 22,73 \text{ МВт.}$$

Проверка:

$$Q_{c.n2} = Q_{c.n} - Q_{c.n1} = 50,0 - 27,27 = 22,73 \text{ МВт.}$$

Энтальпия пара в нижнем подогревателе $h_{c.n1} = 2780 \text{ кДж/кг}$ (по таблицам свойств воды и водяного пара).

Расход пара в нижний сетевой подогреватель

$$D_{c.n1} = \frac{Q_{c.n1}}{(h_{c.n1} - h'_{c.n1}) \eta_{т.а}} = \frac{27270}{(2780 - 419) \cdot 0,98} = 11,786 \text{ кг/с} = 42,43 \text{ т/ч.}$$

Расход пара в верхний сетевой подогреватель

$$D_{c.n2} = \frac{Q_{c.n2}}{(h_{c.n2} - h'_{c.n2}) \eta_{т.а}} = \frac{22730}{(2870 - 533,8) \cdot 0,98} = 9,93 \text{ кг/с} = 35,74 \text{ т/ч.}$$

Задача 4.3. Решить задачу 4.2, если отвод конденсата греющего пара из подогревателей выполнен так, как показано на рис. 4.2. Конденсат греющего пара в подогревателях также не переохлаждается.

Ответ: $D_{c.n2} = 35,74 \text{ т/ч}$; $D_{c.n1} = 40,69 \text{ т/ч}$.

Задача 4.4. В пароводяном подогревателе с площадью поверхности нагрева $F = 27,0 \text{ м}^2$ осуществляется подогрев водопроводной воды с расходом $W_n = 60 \text{ т/ч}$ и температурой на входе в теплообменник $t_{вх} = 15^\circ \text{C}$. На подогрев воды расходуется пар в количестве $D_n = 7,2 \text{ т/ч}$. Параметры пара на входе в теплообменник $p_n = 0,15 \text{ МПа}$; $t_n = 2796 \text{ кДж/кг}$; конденсат пара не переохлаждается; КПД подогревателя $\eta_{т.а} = 0,97$.

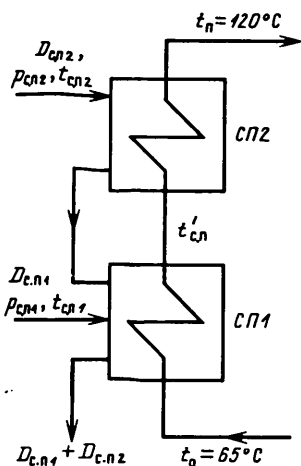


Рис. 4.2. Двухступенчатая сетевая подогревательная установка с каскадным сливом конденсата греющего пара

Определить коэффициент теплопередачи пароводяного подогревателя.

Решение. Тепловая нагрузка подогревателя

$$Q_n = D_n(h_n - h'_n) = \frac{7,2 \cdot 10^3}{3600} (2796 - 467) = 4658 \text{ кВт.}$$

Температуру нагреваемой воды на выходе из теплообменника находят из теплового баланса подогревателя

$$Q_n \eta_{т.а} = W_n(t_{\text{вых}} - t_{\text{вх}}) c_p, \text{ отсюда}$$

$$t_{\text{вых}} = t_{\text{вх}} + \frac{Q_n \eta_{т.а}}{W_n c_p} = 15 + \frac{4658 \cdot 0,97 \cdot 3600}{60 \cdot 10^3 \cdot 4,19} = 79,7^\circ \text{ C.}$$

Среднелогарифмическая разность температур

$$\Delta t_{\text{ср. л}} = \frac{\Delta t_6 - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_6}{\Delta t_m}} = \frac{(111,4 - 15) - (111,4 - 79,7)}{\ln \frac{111,4 - 15}{111,4 - 79,7}} = 58,18^\circ \text{ C.}$$

Коэффициент теплопередачи

$$k = \frac{Q_n \eta_{т.а}}{F \Delta t_{\text{ср. л}}} = \frac{4658 \cdot 0,97}{27 \cdot 58,18} = 2,876 \text{ кВт/(м}^2 \cdot \text{K)}.$$

Задача 4.5. Подобрать сетевой подогреватель и произвести его поверочный расчет для следующих условий работы: расход сетевой воды $G_{с.в} = 450 \text{ т/ч}$; температура воды на входе $t_{\text{вх}} = 70^\circ \text{ C}$, а на выходе из подогревателя $t_{\text{вых}} = 109^\circ \text{ C}$; давление греющего пара $p_{\text{отб}} = 0,2 \text{ МПа}$; энтальпия греющего пара $h_{\text{отб}} = 2730 \text{ кДж/кг}$; $\eta_{т.а} = 0,98$.

Решение. Тепловая нагрузка подогревателя

$$Q_n = G_{с.в} (t_{\text{вых}} - t_{\text{вх}}) c_p = \frac{450 \cdot 10^3}{3600} (109 - 70) \cdot 4,19 = 20426 \text{ кВт.}$$

Температура насыщения греющего пара при давлении $p_{\text{отб}} = 0,2 \text{ МПа}$; $t_n = 120^\circ \text{ C}$.

Расход греющего пара

$$D_n = \frac{Q_n}{(h_{\text{отб}} - h'_{\text{отб}}) \eta_{т.а}} = \frac{20426 \cdot 3600}{(2730 - 503) \cdot 0,98 \cdot 10^3} = 33,68 \text{ т/ч.}$$

Среднелогарифмический температурный напор в подогревателе

$$\Delta t_{\text{ср.л}} = \frac{\Delta t_6 - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_6}{\Delta t_m}} = \frac{(120 - 70) - (120 - 109)}{\ln \frac{50}{11}} = 25,75^\circ \text{C}.$$

Задаемся коэффициентом теплопередачи сетевого подогревателя (с учетом загрязнения трубок) $k = 2600 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Необходимая площадь поверхности нагрева

$$F_n = \frac{Q_n}{k \Delta t_{\text{ср.л}}} = \frac{20426 \cdot 10^3}{2600 \cdot 25,75} = 305 \text{ м}^2.$$

Выбираем сетевой подогреватель вертикального типа ПСВ-315-3-23 с площадью поверхности нагрева 315 м^2 . Технические данные подогревателя: число трубок 1212; число ходов по воде 2; трубки латунные наружным диаметром 19 мм и толщиной стенки 1 мм, высота трубок $H = 4350 \text{ мм}$, расчетное давление в корпусе 0,3 МПа, в трубках 2,3 МПа.

Поверочный расчет теплообменника. Определяем скорость воды в трубках:

$$w_b = \frac{G_{\text{с.в.}} \cdot 10^3 \cdot 4}{3600 \rho \pi d_{\text{вн}}^2 \cdot z/2},$$

где ρ — плотность воды, $\text{кг}/\text{м}^3$. При средней температуре

воды $t_{\text{ср}} = \frac{t_{\text{вх}} + t_{\text{вых}}}{2} = \frac{70 + 109}{2} \approx 90^\circ \text{C}$; $\rho = 965,3 \text{ кг}/\text{м}^3$; $d_{\text{вн}} = 0,017 \text{ м}$;

$z/2$ — число трубок для одного хода воды; $w_b =$

$$= \frac{450 \cdot 10^3 \cdot 4}{3600 \cdot 965,3 \cdot 3,14 \cdot 0,017^2 \cdot 606} = 0,942 \text{ м}/\text{с}.$$

$$\text{Число Рейнольдса } Re = \frac{w_b d_{\text{вн}}}{\nu_b} = \frac{0,942 \cdot 0,017}{0,326 \cdot 10^{-6}} = 491227.$$

Коэффициент теплоотдачи от стенки к воде

$$\frac{\alpha_b d_{\text{вн}}}{\lambda_b} = Nu_b = 0,021 Re^{0,8} Pr^{0,4} \epsilon_l,$$

где $\epsilon_l = 1 + \frac{2}{l/d}$ — поправочный коэффициент;

$$\epsilon_l = 1 + \frac{2}{4,35/0,018} = 1,007;$$

$$Pr = 1,95 \text{ (при } t_b = 90^\circ \text{C)};$$

$$Nu_b = 0,021 \cdot 491227^{0,8} \cdot 1,95^{0,4} \cdot 1,007 = 156,4;$$

$$\alpha_b = \frac{Nu_b \lambda_b}{d_{\text{вн}}} = \frac{156,4 \cdot 0,68}{0,017} = 6259,3 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Для расчета коэффициента теплоотдачи от пара к стенке α_n используем формулу Нуссельта, которая для условий $1 \leq Pr \leq 100$ и $r/(c_p \Delta t) > 5$ дает хорошее совпадение с более точными решениями,

учитывающими силы инерции и конвективный перенос теплоты в пленке:

$$\alpha_n = 0,943 \sqrt[4]{\frac{r \rho_n^2 g \lambda_n^3}{\mu_n (t_n - t_c) H}},$$

где r — теплота конденсации пара при температуре насыщения, Дж/кг; ρ_n , λ_n , μ_n — соответственно плотность, теплопроводность и динамическая вязкость пленки конденсата, определяемые при средней температуре конденсата $t_{cp} = (t_n + t_c)/2$; H — высота трубки. Однако температура стенки t_c неизвестна. Неизвестен и температурный напор $t_n - t_c$, входящий в формулу Нуссельта. Решение подобной задачи можно выполнить либо методом последовательных приближений, либо графоаналитическим методом.

Примем (с последующей проверкой) $\Delta t_{пл} = t_n - t_c = 4^\circ \text{C}$; $t_c = t_n - 4 = 116^\circ \text{C}$. Тогда $t_{cp} = (120 + 116)/2 = 118^\circ \text{C}$; $\rho_n = 944,5 \text{ кг/м}^3$; $\lambda_n = 0,685 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$; $\mu_n = 241,47 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}$;

$$\begin{aligned} \alpha_n &= 0,943 \sqrt[4]{\frac{2204 \cdot 10^3 \cdot 944,5 \cdot 9,8 \cdot 0,685^3}{241,47 \cdot 10^{-6} \cdot 4,35 (t_n - t_c)}} = \\ &= 0,943 \sqrt[4]{\frac{631,955 \cdot 10^{16}}{1050,39 \cdot \Delta t_{пл}}} = 0,943 \cdot 10^4 \cdot 0,88 \Delta t_{пл} - 0,25 = 8298,4 \Delta t_{пл} - 0,25. \end{aligned}$$

Удельный тепловой поток через пленку конденсата $q_{пл} = Q/F =$
 $= \alpha_n \Delta t_{пл} = 8298,4 \Delta t_{пл}^{0,75}$; $q_{пл} = \frac{20426 \cdot 10^3}{315} = 8298,4 \Delta t_{пл}^{0,75}$, отсюда
 $\Delta t_{пл} = 0,75 \sqrt{\frac{20426 \cdot 10^3}{315 \cdot 8298,4}} = 4,67^\circ \text{C}$. Расхождение с первоначально принятым значением невелико.

$$\alpha_n = \frac{8298,4}{4,67^{0,25}} = 5644 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

Коэффициент теплопередачи

$$k' = 1 / \left(\frac{1}{\alpha_n} + \frac{\delta_c}{\lambda_c} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_n} \right).$$

Принимаем толщину накипи $\delta_3 = 0,2 \text{ мм}$; $\lambda_3 = 4,0 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$; теплопроводность латунной стенки $\lambda_c = 105 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$

$$k' = 1 / \left(\frac{1}{5644} + \frac{0,001}{105} + \frac{0,0002}{4,0} + \frac{1}{6259,3} \right) = 2532 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

Тепловая мощность подогревателя

$$Q'_n = F k' \Delta t_{ср.л} = 315 \cdot 2532 \cdot 25,75 = 20537 \text{ кВт}.$$

$Q'_n > Q_n$. Расхождение в балансе тепловой мощности
 $\Delta Q_n = \frac{20537 - 20426}{20537} \cdot 100 = 0,54\%$. Допустимое расхождение 2%.

Задача 4.6. Применительно к условиям задачи 4.5 произвести гидравлический расчет сетевого подогревателя. При расчете принять относительную шероховатость трубок $\Delta = 0,03$.

Решение. Потеря давления на гидравлическое сопротивление подогревателя определяется по формуле Д'Арсси

$$\Delta p = \lambda \frac{l}{d} \frac{w_{\text{в}}^2 \rho}{2} + \sum \xi_m \frac{w_{\text{в}}^2 \rho}{2},$$

где первое слагаемое — потеря давления из-за гидравлического трения в трубках; второе слагаемое — потеря давления на местные сопротивления. Коэффициент гидравлического трения в области автомодельного течения жидкости λ зависит лишь от относительной шероховатости $\Delta = \Delta/d_{\text{вн}}$ и по справочным данным [6] при $\Delta/d_{\text{вн}} = 0,03$ $\lambda = 0,057$; l — длина трубок, м; $d_{\text{вн}}$ — внутренний диаметр трубок; $w_{\text{в}}$ — скорость воды, м/с; ρ — плотность воды; $\sum \xi_m$ — сумма коэффициентов местных сопротивлений.

На основе конструктивных характеристик подогревателя и условий задачи 4.5 имеем

$l = 2 \times 4,65 = 9,3$ м (с учетом вальцовки трубок в трубных досках); $d_{\text{вн}} = 0,017$ м; $w_{\text{в}} = 0,942$ м/с; $\rho = 965,3$ кг/м³. Коэффициенты местных сопротивлений согласно [6]: вход воды в водяную камеру $\xi_{\text{вх}}^{\text{к}} = 1,5$; выход воды из водяной камеры $\xi_{\text{вых}}^{\text{к}} = 1,5$; вход воды в трубки $\xi_{\text{вх}}^{\text{т}} = 2 \times 1,0 = 2,0$; выход воды из трубок $\xi_{\text{вых}}^{\text{т}} = 2 \times 1,0 = 2,0$; поворот воды на 180° $\xi_{\text{пов}} = 1 \times 2,5 = 2,5$.

Сумма $\sum \xi_m = 9,5$.

Потеря давления

$$\Delta p = \left(0,057 \frac{9,3}{0,017} + 9,5 \right) \frac{0,942^2 \cdot 965,3}{2} = 17423,7 \text{ Н/м}^2 \approx 17,42 \text{ кПа}.$$

Задача 4.7. Рассчитать сетевую теплоподготовительную установку к турбине Т-250/300-240 при трехступенчатом подогреве сетевой воды (в режиме работы турбины с противодавлением). Присоединенная коммунально-бытовая тепловая нагрузка турбины $Q_{\text{т}} = 420$ МВт. Температура обратной сетевой воды $t_2 = 48^\circ \text{C}$; расход сетевой воды $G_{\text{с.в}} = 7000$ т/ч. Турбина имеет два теплофикационных отбора пара при одном регулирующем органе, расположенном за камерой нижнего отбора (поворотная диафрагма). Сетевая вода перед входом в нижний сетевой подогреватель (Б1) подогревается в теплофикационном трубном пучке конденсатора турбины и в подогревателе уплотнений (СБ) (рис. 4.3). Пропускная способность регулирующей диафрагмы в закрытом положении при давлении перед ней $0,1$ МПа; $K_1 = 60 \cdot 10^4$ кг/(ч·МПа). Пропускная способность промежуточного отсека турбины (отсека между верхним теплофикационным отбором и цилиндром низкого давления) $K_2 = 450 \cdot 10^4$ кг/(ч·МПа). Тепловая нагрузка подогревателя уплотнений $Q_{\text{сб}} = 5,7$ МВт (по заводским данным). Расход пара в регенеративный подогреватель П2 $D_{\text{п2}} = 7,6$ т/ч; а регенеративный подогреватель П1 отключен.

Решение. Так как режим работы теплоподогревательной установки зависит не только от режима работы тепловой сети, но и от режима работы турбоустановки, решение данной задачи сводится

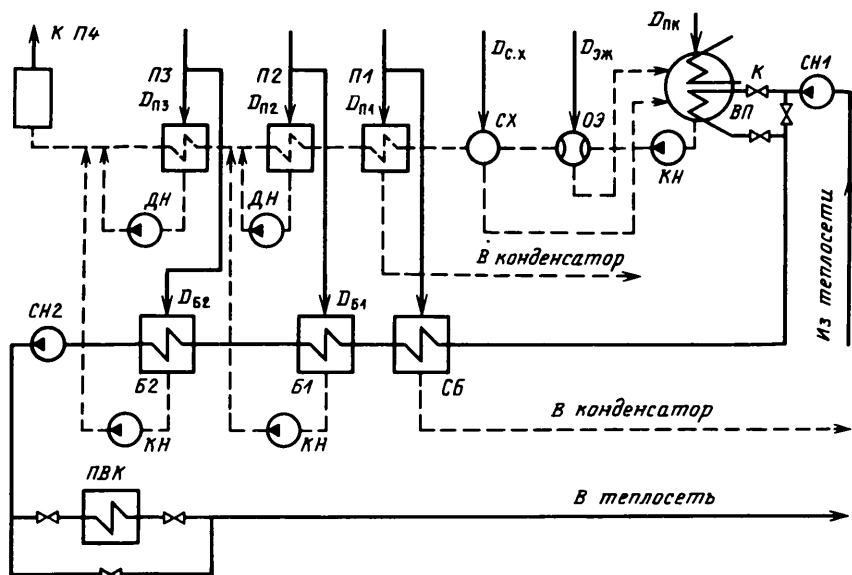


Рис. 4.3. Принципиальная схема теплоподготовительной установки к турбине Т-250/300-240:

СН1, СН2—сетевые насосы первой и второй ступеней; К—конденсатор турбины; ВП—встроенный конденсационный пучок; СБ—сальниковый бойлер; Б1, Б2—сетевые подогреватели нижней и верхней ступеней; КН—конденсатный насос; ПБК—пиковый водогрейный котел; П1, П2, П3—регенеративные подогреватели за номерами 1, 2, 3; СХ—охладитель пара из уплотнений; ОЭ—охладитель пара эжекторов; ДН—дренажный насос

к совместному решению методом последовательных приближений двух уравнений: уравнения теплового баланса теплофикационной установки турбины

$$Q_T = Q_{Б1} + Q_{Б2} + Q_{ВП} + Q_{СБ} \quad (4.1)$$

и уравнения, связывающего давление пара в камерах теплофикационных отборов с расходом пара через отсек ступеней между ними (промежуточный отсек),

$$p_{отб\ 2}^{abc} = \sqrt{\left(\frac{D_{п.о}}{K_2}\right)^2 + (p_{отб\ 1}^{abc})^2}. \quad (4.2)$$

Предварительно задаемся давлением в нижнем подогревателе $p_{Б1} = 0,08$ МПа, чему соответствует температура насыщения пара $t_{Б1} = 93^\circ \text{C}$. Давление в нижнем отборе $p_{отб\ 1} = p_{Б1} + \Delta p_{Б1}$, где $\Delta p_{Б1}$ —потеря давления в подводящих трубопроводах нижнего сетевого подогревателя. Предварительно задаемся $\Delta p_{Б1} = 0,07 p_{Б1} = 0,07 \cdot 0,08 = 0,0056$ МПа; $p_{отб\ 1} = 0,08 + 0,0056 = 0,0856$ МПа.

Расход пара в конденсатор равен расходу пара в ЧНД (подогреватель П1 отключен). При работе с закрытой поворотной диафрагмой расход пара в конденсатор прямо пропорционален давлению пара перед диафрагмой:

$$D_{\kappa} = D_{\text{чнд}} = p_{\text{отб1}} K_1 = 0,0856 \cdot 60 \cdot 10^4 = 51,36 \text{ т/ч.}$$

Тепловая нагрузка встроенного теплофикационного пучка $Q_{\text{в.п}} = D_{\text{чнд}} \Delta h_{\kappa}$, где Δh_{κ} — разность энтальпий пара и конденсата в конденсаторе. Принимаем (на основе опыта эксплуатации) $\Delta h_{\kappa} = 2350 \text{ кДж/кг}$:

$$Q_{\text{в.п}} = 51,36 \cdot 10^3 \cdot 2350 = 33,5 \text{ МВт.}$$

Тепловая нагрузка встроенного пучка с учетом подогрева сетевой воды в сальниковом подогревателе

$$Q'_{\text{в.п}} = Q_{\text{в.п}} + Q_{\text{сб}} = 33,5 + 5,7 = 39,2 \text{ МВт.}$$

Тепловая нагрузка сетевых подогревателей:
нижнего

$$Q_{\text{Б1}} = \varepsilon_{\text{Б1}} W (t_{\text{Б1}}^{\text{н}} - \tau_{\text{Б1}}); \quad (\text{a})$$

верхнего

$$Q_{\text{Б2}} = \varepsilon_{\text{Б2}} W (t_{\text{Б2}}^{\text{н}} - \tau_{\text{Б2}}). \quad (\text{б})$$

Тепловая нагрузка турбины

$$Q_{\text{т}} = Q_{\text{Б1}} + Q_{\text{Б2}} + Q'_{\text{в.п}}. \quad (\text{в})$$

В уравнениях (а) и (б) $\varepsilon_{\text{Б1}}$ и $\varepsilon_{\text{Б2}}$ — удельные безразмерные тепловые мощности сетевых подогревателей (соответственно нижнего и верхнего); W — тепловой эквивалент сетевой воды, $\text{кДж}/(\text{ч} \cdot \text{К})$; $t_{\text{Б1}}^{\text{н}}$, $t_{\text{Б2}}^{\text{н}}$ — температуры насыщения греющего пара в нижнем и верхнем пароподогревателях; $\tau_{\text{Б1}}$, $\tau_{\text{Б2}}$ — температуры сетевой воды на входе соответственно нижнего и верхнего подогревателей; $\varepsilon = 1 - \frac{1}{e^{\Phi/\sqrt{W}}}$, где Φ — параметр подогревателя; для нижнего подогревателя $\Phi = 6468 \left(\frac{\text{кДж}}{\text{ч}} \cdot \text{К} \right)^{0,5}$, для верхнего $\Phi = 7246 \left(\frac{\text{кДж}}{\text{ч}} \cdot \text{К} \right)^{0,5}$. Для обоих подогревателей $W = 7000 \cdot 4,19 \cdot 10^3 = 29,3 \cdot 10^6 \text{ кДж}/(\text{ч} \cdot \text{К})$:

$$\varepsilon_{\text{Б1}} = 1 - \frac{1}{e^{6468/\sqrt{29,3 \cdot 10^6}}} = 0,697;$$

$$\varepsilon_{\text{Б2}} = 1 - \frac{1}{e^{7246/\sqrt{29,3 \cdot 10^6}}} = 0,738.$$

Из совместного решения уравнений (а), (б) и (в) получаем зависимость для температуры насыщения пара в верхнем сетевом подогревателе:

$$t_{\text{Б2}}^{\text{н}} = \frac{Q_{\text{т}}}{\varepsilon_{\text{Б2}} W} - \varepsilon_{\text{Б1}} \left(\frac{1}{\varepsilon_{\text{Б2}}} - 1 \right) (t_{\text{Б1}}^{\text{н}} - \tau_2) - \frac{Q'_{\text{в.п}}}{W} \left(\frac{1}{\varepsilon_{\text{Б2}}} - 1 \right) (1 - \varepsilon_{\text{Б1}}) + \tau_2;$$

$$t_{\text{Б2}}^{\text{н}} = \frac{420 \cdot 10^6 \cdot 3600}{0,737 \cdot 7 \cdot 10^6 \cdot 4,19 \cdot 10^3} - 0,697 \left(\frac{1}{0,738} - 1 \right) (93 - 48) -$$

$$-\frac{39,2 \cdot 10^6 \cdot 3600}{7 \cdot 10^6 \cdot 4,19 \cdot 10^3} \left(\frac{1}{0,738} - 1 \right) (1 - 0,697) + 48 =$$

$$= 69,95 - 11,13 - 0,52 + 48 = 106,3^\circ \text{ С.}$$

Давление в подогревателе $p_{Б2} = f(t_{Б2}^n) = 0,125 \text{ МПа.}$

Расход пара в бойлер Б1

$$D_{Б1} = \frac{\epsilon_{Б1}}{\Delta h_{Б1}} [W(t_{Б1}^n - \tau_2) - Q_{в.п}] =$$

$$= \frac{0,697}{2350} [29,3 \cdot 10^6 (93 - 48) - 39,2 \cdot 10^6] = 379,4 \text{ т/ч.}$$

Потеря давления в паропроводах от отбора до нижнего подогревателя (Б1)

$$\Delta p_{Б1} = 0,22 \cdot 10^{-14} \frac{D_{Б1}^2}{p_{Б1}} + 0,00215;$$

$$\Delta p_{Б1} = 0,22 \cdot 10^{-14} \frac{(379,4 \cdot 10^3)^2}{0,08} + 0,00215 = 0,0061 \text{ МПа.}$$

Давление в камере нижнего отбора

$$p_{отб1} = p_{Б1} + \Delta p_{Б1} = 0,08 + 0,0061 = 0,0861 \text{ МПа.}$$

Расхождение с ранее принятым значением $p_{отб1} = 0,0856 \text{ МПа}$ невелико. Для лучшего схождения следует задаться новым значением $p_{отб1}$.

Расход пара на верхний сетевой подогреватель

$$D_{Б2} = \frac{Q_{\tau} - D_{Б1} \Delta h_{Б1} - Q'_{в.п}}{\Delta h_{Б2}} = \frac{420 \cdot 10^6 - \frac{379,4 \cdot 10^3 \cdot 2350}{3600} - 39,2 \cdot 10^6}{2350} =$$

$$= 56,653 \text{ кг/с} = 203,95 \text{ т/ч.}$$

Потеря давления в паропроводах от отбора до верхнего подогревателя (Б2)

$$\Delta p_{Б2} = 0,85 \cdot 10^{-13} \frac{D_{Б2}^2}{p_{Б2}} + 0,00235;$$

$$\Delta p_{Б2} = \frac{0,85 (203,95 \cdot 10^3)^2}{10^{13} \cdot 0,125} + 0,00235 = 0,005 \text{ МПа.}$$

Давление в камере верхнего отбора

$$p_{отб2} = p_{Б2} + \Delta p_{Б2} = 0,125 + 0,005 = 0,13 \text{ МПа.}$$

Найденные значения абсолютного давления $p_{отб2}$ должно удовлетворять уравнению (4.2).

Расход пара через промежуточный отсек

$$D_{п.о} = D_{Б1} + D_{чнд} + D_{П2} = 379,4 + 51,36 + 7,6 = 438,4 \text{ т/ч;}$$

$$p_{отб2} = \sqrt{\left(\frac{438,4 \cdot 10^3}{450 \cdot 10^4}\right)^2 + (0,0856)^2} = 0,1296 \text{ МПа.}$$

Расхождение невелико. Окончательно принимаем: давление в камере нижнего отбора $p_{отб1} = 0,086 \text{ МПа}$; давление в камере верхнего отбора $p_{отб2} = 0,13 \text{ МПа}$.

Турбина Т-250/300-240 комплектуется двумя горизонтальными сетевыми подогревателями типа ПСГ-5000-2,5-8-1 (для нижней ступени) и ПСГ-5000-3,5-8-1 (для верхней ступени) с площадью поверхности нагрева 5000 м^2 .

Для упрощенных расчетов теплоподготовительной установки можно принимать $Q_{Б1} = 0,65 Q_{отб}$; $Q_{Б2} = 0,35 Q_{отб}$.

Задача 4.8. Произвести поверочный тепловой и гидравлический расчет сетевого подогревателя ПСГ-5000-2,5-8-1 (для нижней ступени подогрева в турбоустановке Т-250/230-240) по исходным данным, полученным в результате решения задачи 4.7 и техническим данным сетевого подогревателя.

Подогреватель горизонтальный; кожухотрубный число ходов по воде $z=4$; число трубок $n=7325$ шт.; трубки латунные диаметром $d_n/d_{вн}=25/23 \text{ мм}$; длина трубок $l=8,7 \text{ м}$ в одном ходе воды.

Решение. Тепловая нагрузка подогревателя

$$Q_{Б1} = 0,65 Q_{отб} = 0,65 (Q_T - Q'_{в.п}) = 0,65 (420 - 39,2) = 247,5 \text{ МВт.}$$

Температура воды на выходе из подогревателя

$$t_{Б1}^{вх} = t_{Б1}^{вх} + \frac{Q_{Б1}}{G_{св} c_p} = 52,8 + \frac{247 \cdot 500}{7000 \cdot \frac{4,19}{3,6}} \approx 83^\circ \text{ С.}$$

Среднелогарифмическая разность температур

$$\Delta t_{ср.л} = \frac{\Delta t_6 - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_6}{\Delta t_m}} = \frac{(93 - 52,8) - (93 - 83)}{\ln \frac{93 - 52,8}{93 - 83}} = 21,6^\circ \text{ С.}$$

Средняя температура воды $t_{ср} = t_n - \Delta t_{ср.л} = 93 - 21,6 = 71,4^\circ \text{ С.}$

Скорость сетевой воды в трубках

$$w_{с.в} = \frac{G_{с.в}}{f_{с.в} \rho},$$

где $G_{с.в}$ — расход воды; ρ — плотность воды; $f_{с.в}$ — площадь проходного сечения для одного хода воды; $G_{с.в} = \frac{7000 \cdot 10^3}{3600} = 1944,44 \text{ кг/с}$; $\rho = 976 \text{ кг/м}^3$ (при средней температуре воды $t_{ср} = 71,4^\circ \text{ С}$);

$$f_{с.в} = \frac{\pi d_{вн}^2 n}{4z} = \frac{3,14 \cdot 0,023^2}{4 \cdot 4} \cdot 7325 = 0,76 \text{ м}^2;$$

$$w_{с.в} = \frac{1944,44}{0,76 \cdot 976} = 2,61 \text{ м/с.}$$

Коэффициент теплоотдачи внутри трубок [12]

$$\alpha_{с.в} = (1630 + 21t_{ср} - 0,041t_{ср}^2) \frac{w_{с.в}^{0,8}}{d_{вн}^{0,2}},$$

где $t_{ср}$ — средняя температура воды в трубках, °C; $d_{вн}$ — внутренний диаметр трубки, м;

$$\alpha_{с.в} = (1630 + 21 \cdot 71,4 - 0,041 \cdot 71,4^2) \frac{2,61^{0,8}}{0,023^{0,2}} = 13\,378 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

Коэффициент теплоотдачи от пара к трубкам [12]

$$\alpha_n = \frac{4920 + 58t_n - 0,175t_n^2}{(md_n\theta)^{0,25}} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)},$$

где $t_n = \frac{t_n + t_c}{2}$ — средняя температура планки конденсата, °C; $\theta = t_n - t_c$,

где t_n — температура насыщения пара, °C; t_c — температура стенки, °C; $m = 57$ — приведенное число рядов трубок в вертикальном ряду.

Температура стенки t_c заранее неизвестна. Задаемся $t_c = 87^\circ \text{C}$ (с последующей проверкой):

$$t_n = (t_n + t_c)/2 = (93 + 87)/2 = 90^\circ \text{C};$$

$$\alpha_n = \frac{4920 + 58 \cdot 90 - 0,175 \cdot 90^2}{(57 \cdot 0,025)^{0,25}} \theta^{-0,25} = 7983,4 \theta^{-0,25}.$$

С другой стороны, $\alpha_n \theta = q$, где q — удельный тепловой поток $q = \theta/F = (247,5 \cdot 10^6)/5000 = 49\,500 \text{ Вт/м}^2$;

$$7983,4 \theta^{-0,25} \theta = 49\,500; \quad \theta = 0,75 \sqrt[4]{\frac{49\,500}{7983,4}} = 3,93^\circ \text{C}; \quad t_c = t_n - \theta = 93 - 3,93 \approx 89^\circ \text{C}.$$

Уточняем значение температуры пленки конденсата: $t_n = \frac{t_n + t_c}{2} = \frac{93 + 89}{2} = 91^\circ \text{C}$. Уточняем значение α_n :

$$\alpha_n = \frac{4920 + 58 \cdot 91 - 0,175 \cdot 90^2}{(57 \cdot 0,025)^{0,25}} \theta^{-0,25} = 8007,5 \theta^{-0,25};$$

$$8007,5 \theta^{0,75} = 49\,500; \quad \theta = 0,75 \sqrt[4]{\frac{49\,500}{8007,5}} = 3,92^\circ \text{C};$$

$t_c = t_n - \theta = 93 - 3,92 \approx 89^\circ \text{C}$. Принимаем окончательно температуру стенки с паровой стороны $t_c = 89^\circ \text{C}$;

$$\alpha_n = \frac{8007,5}{(93 - 89)^{0,25}} = 5690 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

Коэффициент теплопередачи $k = 1 / \left(\frac{1}{\alpha_n} + \frac{\delta_c}{\lambda_c} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_n} \right)$; $\delta_c = 0,001 \text{ м}$; $\lambda_c = 105 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$; $\delta_3 = 0,0005 \text{ м}$; $\lambda = 4,0 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$;

$$k = 1 / \left(\frac{1}{5690} + \frac{0,001}{105} + \frac{0,0005}{4,0} + \frac{1}{13\,378} \right) = 2597 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Поверхности нагрева по расчету

$$F = \frac{Q}{k \Delta t_{\text{ср.л}}} = \frac{247,5 \cdot 10^6}{2597 \cdot 21,6} = 4412 \text{ м}^2.$$

Таким образом, имеем запас по поверхности нагрева подогревателя.

Гидравлический расчет (см. решение задачи 4.6):

$$\Delta p_{\text{Б1}} = \frac{w_{\text{с.в}}^2 \rho}{2} \left(\lambda_{\text{т}} \frac{L}{d_{\text{вн}}} + \sum \xi_{\text{м}} \right).$$

Коэффициент гидравлического трения $\lambda_{\text{т}} = 0,03$ (зависит от относительной шероховатости стенки трубок $\bar{\Delta}$); $w_{\text{с.в}} = 2,61 \text{ м/с}$; $\rho = 976 \text{ кг/м}^3$. Суммарная длина хода воды в трубках $L = 4l_{\text{тр}} = 4 \cdot 8,7 = 34,8 \text{ м}$; $d_{\text{вн}} = 0,023 \text{ м}$.

Сумма коэффициентов местных сопротивлений $\sum \xi_{\text{м}}$ складывается из следующих составляющих [6]:

вход в водяную камеру $\xi_{\text{вх}}^{\text{кам}} = 1 \times 1,5 = 1,5$;

вход воды в трубки $\xi_{\text{вх}}^{\text{тр}} = 4 \times 1,0 = 4,0$;

выход воды из трубок $\xi_{\text{вых}}^{\text{тр}} = 4 \times 1,0 = 4,0$;

поворот воды на 180° $\xi_{180} = 3 \times 2,5 = 7,5$;

выход из водяной камеры $\xi_{\text{вых}}^{\text{кам}} = 1 \times 1,5 = 1,5$.

$$\sum \xi_{\text{м}} = 18,5$$

Потеря давления

$$\Delta p_{\text{Б1}} = \frac{2,61^2 \cdot 976}{2} \left(\frac{0,03 \cdot 34,8}{0,023} + 18,5 \right) = 212,4 \text{ кПа};$$

такое большое сопротивление подогревателя обуславливается высокой скоростью воды в трубках.

Задача 4.9. Определить температуру химически очищенной воды ($t_{\text{х.о.в}}$) и выход пара из сепаратора непрерывной продувки котла $d_{\text{сеп}}$, если известно $D_{\text{прод}} = 3,0 \text{ т/ч}$ (рис. 4.4); давление в барабане котла $p_6 = 14 \text{ МПа}$; давление в сепараторе $p_{\text{сеп}} = 0,7 \text{ МПа}$; расход химически очищенной воды $D_{\text{х.о.в}} = 2,8 \text{ т/ч}$; температура химически очищенной воды $t_{\text{х.о.в}} = 30^\circ \text{С}$. Продувочная вода после подогревателя химически очищенной воды с температурой $t'_{\text{прод}} = 57^\circ \text{С}$ сбрасывается в дренаж.

Решение. По давлению в барабане котла определяем энтальпию продувочной воды $h'_{\text{прод}} = 1572,3 \text{ кДж/кг}$.

Тепловой баланс сепаратора

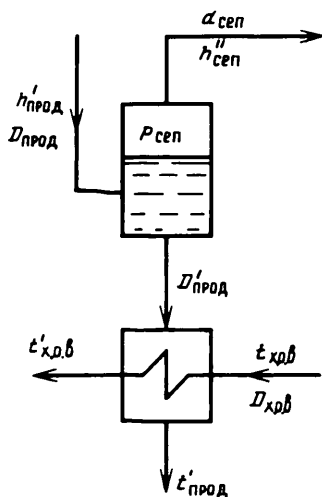
$$D_{\text{прод}} h'_{\text{прод}} \eta_{\text{сеп}} = d_{\text{сеп}} h''_{\text{сеп}} + D'_{\text{прод}} h'_{\text{сеп}} \eta_{\text{сеп}}.$$

Материальный баланс сепаратора

$$D_{\text{прод}} = D'_{\text{прод}} + d_{\text{сеп}}.$$

Из совместного решения этих уравнений

Рис. 4.4. Одноступенчатый сепаратор непрерывной продувки котла



$$d_{сеп} = \frac{D_{прод} (h'_{прод} - h'_{сеп}) \eta_{сеп}}{h''_{сеп} - h'_{сеп}};$$

$$h''_{сеп} = 2765 \text{ кДж/кг}; \quad h'_{сеп} = 696,8 \text{ кДж/кг} \quad (\text{при } p_{сеп} = 0,7 \text{ МПа});$$

$$d_{сеп} = \frac{3,0 (1572,3 - 696,8) \cdot 0,98}{2765 - 696,8} = 1,2445 \text{ т/ч} \approx 1,24 \text{ т/ч}.$$

Количество сбрасываемой продувочной воды $D_{прод} = 3,0 - 1,24 = 1,76 \text{ т/ч}$.

Количество теплоты, сбрасываемой с продувочной водой, $Q'_{прод} = D_{прод} (h'_{сеп} - t'_{прод} c_p) = 1,75 (696,8 - 57 \cdot 4,19) \cdot 10^3 = 803,9 \times 10^3 \text{ кДж/ч}$; $t'_{х.о.в} = t_{х.о.в} + \frac{Q'_{прод}}{D_{х.о.в} \cdot 4,19} = 30 +$

$$+ \frac{803,9 \cdot 10^3}{2,8 \cdot 10^3 \cdot 4,19} = 98,5^\circ \text{ C}.$$

Задача 4.10. Рассчитать двухступенчатый сепаратор непрерывной продувки котла (рис. 4.5). Исходные данные: давление в барабане котла $p_6 = 14,0 \text{ МПа}$; давление в сепараторе первой ступени $p_{сеп1} = 0,7 \text{ МПа}$; давление в сепараторе второй ступени $p_{сеп2} = 0,12 \text{ МПа}$; расход продувочной воды $D_{прод} = 9,0 \text{ т/ч}$; расход химически очищенной воды $W_{х.о.в} = 6,5 \text{ т/ч}$. Потери теплоты в окружающую среду составляют 2%. Продувочная вода после подогревателя химически очищенной воды направляется на подпитку теплосети с температурой 60° C .

Ответ: $d_{сеп1} = 3,73 \text{ т/ч}$; $d_{сеп2} = 0,596 \text{ т/ч}$. Количество сбрасываемой продувочной воды $D_{прод} = 9,0 - 4,326 = 4,674 \text{ т/ч}$; подогрев химически очищенной воды $\Delta t_{х.о.в} = 43^\circ \text{ C}$.

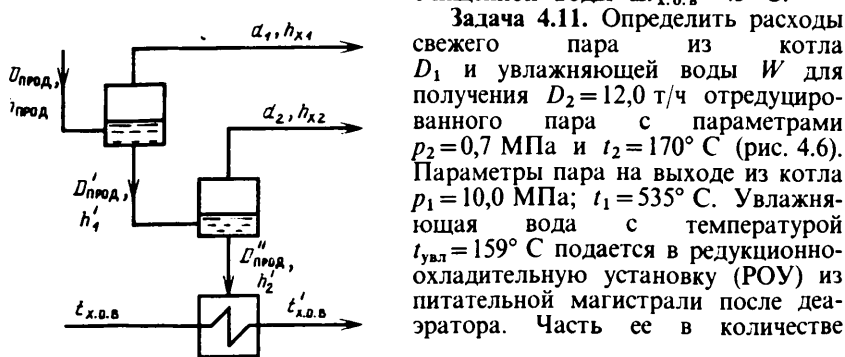


Рис. 4.5. Двухступенчатый сепаратор непрерывной продувки котла

Рис. 4.6. Принципиальная схема редукционно-охладительной установки

$\varphi = 75\%$ испаряется, а остальная часть $(1-\varphi) = 25\%$ с энтальпией насыщения сливается в деаэратор. Потери теплоты в РОУ составляют 2%.

Решение. Уравнение материального баланса РОУ: $D_2 = D_1 + \varphi W$.

Уравнение теплового баланса РОУ:

$$D_2 h_2 + W(1-\varphi) h'_2 = D_1 h_1 \eta_{\text{РОУ}} + W h'_{\text{увл}},$$

где h_1 , h_2 , h'_2 и $h'_{\text{увл}}$ — энтальпии соответственно свежего, отредуцированного пара, сливаемой из РОУ воды и питательной (увлажняющей) воды, кДж/кг.

Из совместного решения уравнений балансов находим выражение для расхода увлажняющей воды:

$$W = \frac{D_2 (h_1 \eta_{\text{РОУ}} - h_2)}{\varphi (h_1 \eta_{\text{РОУ}} - h'_2) + h'_2 - h'_{\text{увл}}};$$

здесь $h_1 = 3460$ кДж/кг; $h_2 = 2778$ кДж/кг; $h'_2 = 696$ кДж/кг; $h'_{\text{увл}} = 672$ кДж/кг; тогда

$$W = \frac{12,0 (3460 \cdot 0,98 - 2778)}{0,75 (3460 \cdot 0,98 - 696) + 696 - 672} = 3,596 \text{ т/ч.}$$

Расход пара из котла

$$D_1 = D_2 - \varphi W = 12,0 - 3,596 \cdot 0,75 = 9,303 \text{ т/ч.}$$

Количество испаряющейся воды в РОУ

$$\varphi W = 3,596 \cdot 0,75 = 2,697 \text{ т/ч.}$$

Количество воды, сливаемой из РОУ,

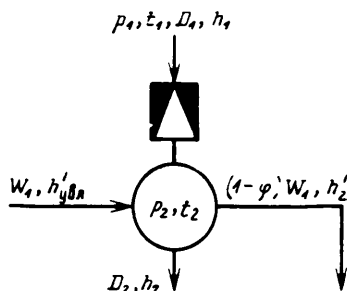
$$(1-\varphi) W = 0,25 \cdot 3,596 = 0,899 \text{ т/ч.}$$

Проверка правильности решения по тепловому балансу: $12 \cdot 10^3 \cdot 2778 = 9,303 \cdot 10^3 \cdot 3460 \cdot 0,98 + 3,596 \cdot 10^3 \cdot 672 - 0,899 \cdot 10^3 \cdot 696 \times 33 \cdot 336 \cdot 10^3 \approx 33335,42 \cdot 10^3$. Расхождение небольшое.

Задача 4.12. Определить параметры отредуцированного пара и расход увлажняющей воды, если 20% ее с температурой, равной температуре насыщения, сливается из РОУ. Расход свежего пара из котла $D_1 = 10$ т/ч, энтальпия пара в котле $h_1 = 3400$ кДж/кг. Расход отредуцированного пара $D_2 = 12,5$ т/ч. Давление в РОУ $p_2 = 0,588$ МПа; энтальпия увлажняющей воды $h'_{\text{увл}} = 435$ кДж/кг. Потерями теплоты в РОУ пренебречь.

Ответ: $W_{\text{увл}} = 3,125$ т/ч; $h_2 = 2912$ кДж/кг; $t_2 = 230^\circ \text{C}$ (пар перегретый).

Задача 4.13. Определить расход инжектируемого и рабочего пара для получения в струйном компрессоре (рис. 4.7) 25 т/ч смешанного



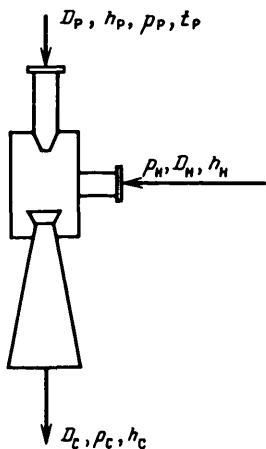
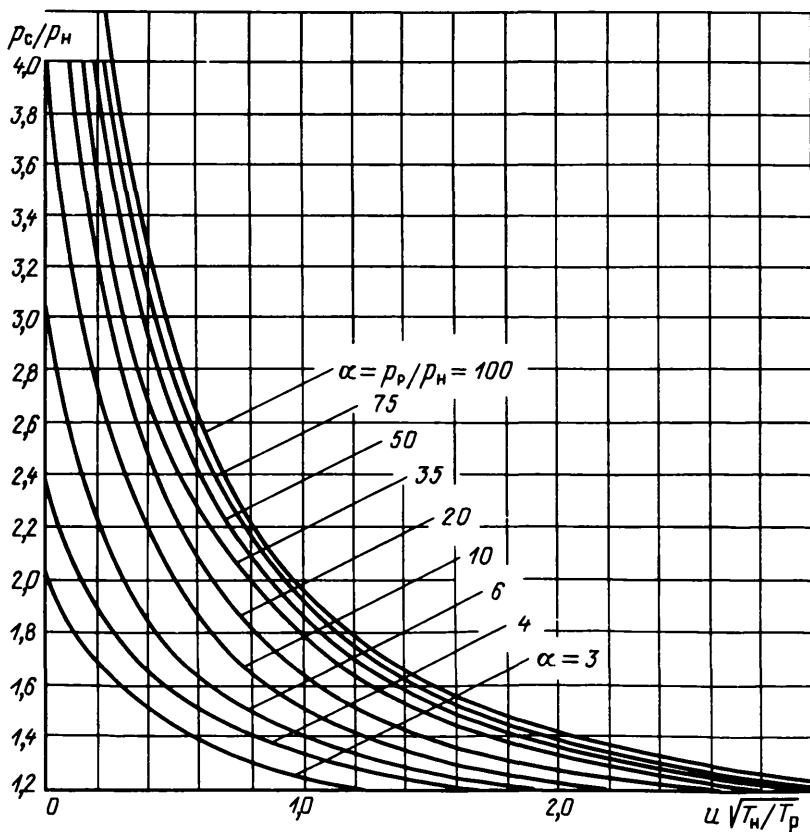


Рис. 4.7. Пароструйный компрессор

Рис. 4.8. Номограмма ВТИ для расчета пароструйных компрессоров:

$u = D_n/D_p$ — коэффициент инjection; T_n, T_p — абсолютные температуры соответственно инjectionируемого и рабочего пара; p_c — давление пара за струйным компрессором; p_n — давление инjectionируемого пара; p_p — давление рабочего пара



пара с давлением $p_{см}=0,5$ МПа. Параметры рабочего пара $p_p=3,0$ МПа; $t_0=450^\circ\text{C}$. Параметры инжектируемого пара $p_n=0,25$ МПа; $t_n=140^\circ\text{C}$.

Решение. На основе материального баланса струйного компрессора $D_{см}=D_p+D_n$ или $D_p=D_{см}-D_n$.

По определению коэффициент инжекции $u=D_n/D_p$. В свою очередь $u=f\left(\frac{p_p}{p_n}, \frac{p_{см}}{p_n}\right)$. Пользуясь номограммой ВТИ (рис. 4.8) [13], можно

определить u : $\frac{p_p}{p_n}=\frac{3,0}{0,25}=12$; $\frac{p_{см}}{p_n}=\frac{0,5}{0,25}=2$. Из рис. 4.8 имеем

$u\sqrt{T_n/T_p}=0,55$; $\sqrt{T_n/T_p}=\sqrt{\frac{413}{733}}=0,750$; $u=\frac{0,55}{0,750}=0,733$; $D_p=25-D_n$;

с другой стороны, $D_p=\frac{D_n}{u}=\frac{D_n}{0,733}$;

$$25-D_n=\frac{D_n}{0,733}; \quad 1,733D_n=25\cdot 0,733;$$

$$D_n=10,574 \text{ т/ч};$$

$$D_p=\frac{10,574}{0,733}=14,425.$$

Проверка: $D_{см}=14,425+10,574=24,999 \text{ т/ч} \approx 25 \text{ т/ч}$.

Задача 4.14. Для условий задачи 4.13 определить энтальпию и температуру смешанного пара на выходе из компрессора.

Решение. Энтальпия смешанного пара

$$h_{см}=\frac{h_p+h_n u}{1+u}=\frac{3340+2756\cdot 0,733}{1+0,733}=3092 \text{ кДж/кг}.$$

$$\text{Проверка: } h_{см}=\frac{D_p h_p+D_n h_n}{D_{см}}=\frac{3340\cdot 14,425+2756\cdot 10,574}{25,0}=3092,8 \text{ кДж/кг}.$$

По h , s -диаграмме при $p_{см}=0,5$ МПа и $h_{см}=3092$ кДж/кг определяем $t_{см}=272^\circ\text{C}$.

Задача 4.15. Пользуясь номограммой ВТИ (рис. 4.8), определить конечные параметры пара за струйным компрессором, коэффициент инжекции которого $u=1,25$. Параметры рабочего пара: $p_p=12,74$ МПа; $t_p=540^\circ\text{C}$; параметры инжектируемого пара $p_n=0,255$ МПа; $t_n=300^\circ\text{C}$.

Ответ: $p_{см}=0,464$ МПа; $t_{см}=392^\circ\text{C}$; $h_{см}=3259$ кДж/кг.

Задача 4.16. Рассчитать двухступенчатую испарительную установку с параллельным питанием производительностью по дистилляту $D_n=20$ т/ч (рис. 4.9). Параметры греющего (отборного) пара: $p_{отб}=0,686$ МПа; $t_{отб}=250^\circ\text{C}$ ($h_{отб}=2950$ кДж/кг). Температурный напор в каждой ступени испарителя принять $\theta=15^\circ\text{C}$. Продувка испарителей $\alpha_{прод}=10\%$ производительности каждой ступени. Температура питательной воды испарителей $t_{п.в.}=125^\circ\text{C}$; температура химически очищенной деаэрированной воды $t_{х.о.в.}=104^\circ\text{C}$. Продувочная вода испарителей после охладителя продувки с температурой $t_{сл}=110^\circ\text{C}$ сливается в дренаж. Сухость вторичного пара испарителей принять 100% ; КПД испарителей $\eta_i=98\%$.

Решение. Температура насыщения вторичного пара первой ступени $t_{н1}^n=t_{отб}^n-\theta=164,17-15=149,17^\circ\text{C}$. Этой температуре соответствует

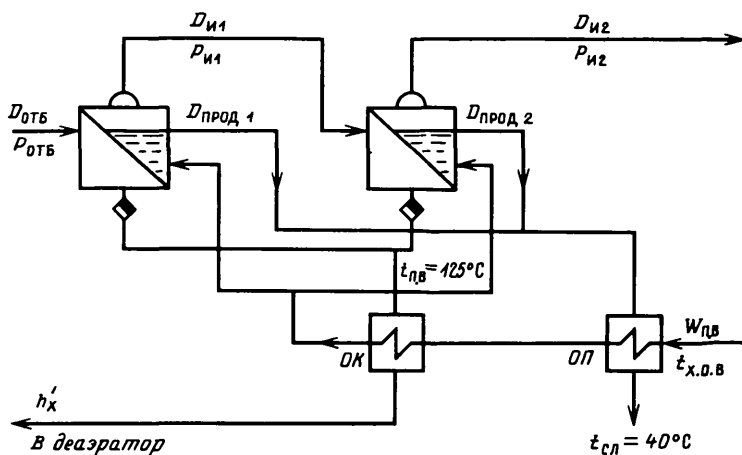


Рис. 4.9. Двухступенчатая испарительная установка с параллельным питанием:

ОК—охладитель конденсата; ОП—охладитель продуквки

давление вторичного пара первой ступени $p_{и1}=0,463$ МПа. Энтальпия вторичного пара первой ступени $h''_{и1}=2748$ кДж/кг. Температура насыщения вторичного пара второй ступени $t''_{и2}=t''_{и1}-\theta=149,17-15=134,17^\circ\text{C}$. Этой температуре соответствует давление вторичного пара второй ступени $p_{и2}=0,304$ МПа. Энтальпия вторичного пара второй ступени $h''_{и2}=2728$ кДж/кг. Уравнение теплового баланса испарителя первой ступени:

$$\begin{aligned} D_{отб}(h_{отб}-h'_{отб})\eta_{и1} &= D_{и1}(h''_{и1}-h'_{п.в}) + D_{прод 1}(h_{и1}-h'_{п.в}); \\ D_{отб}(2950-694)0,98 &= D_{и1}(2748-523) + 0,1 D_{и1}(628,5-523); \\ 2210,8 D_{отб} &= 2235,5 D_{и1}. \end{aligned} \quad (a)$$

Уравнение теплового баланса второй ступени испарителя

$$\begin{aligned} D_{и1}(h''_{и1}-h'_{и1})\eta_{и2} &= D_{и2}(h''_{и2}-h'_{п.в}) + D_{прод 2}(h'_{и2}-h'_{п.в}); \\ D_{и1}(2748-628,5)0,98 &= D_{и2}(2728-523) + 0,1 D_{и2}(564,4-523); \\ 2077 D_{и1} &= 2209,14 D_{и2}; \quad D_{и1}=1,063 D_{и2}. \end{aligned} \quad (б)$$

Уравнение материального баланса (по условию задачи)

$$D_{и1} + D_{и2} = 20 \text{ т/ч}. \quad (в)$$

Из совместного решения уравнений (а), (б) и (в):

$$D_{и1}=10,305 \text{ т/ч}; \quad D_{и2}=9,695 \text{ т/ч}; \quad D_{отб}=10,42 \text{ т/ч}.$$

Расчет охладителя продуквки:

$$W_{п.в}(t_{о.п}-t_{х.о.в})c_p = D_{прод 1}(h'_{и1}-h'_{сл}) + D_{прод 2}(h'_{и2}-h'_{сл});$$

$$t_{o.п} = t_{x.o.в} + \frac{0,1 D_1 (h'_{н1} - h'_{сл}) + 0,1 D_{н2} (h'_{н2} - h'_{сл})}{W_{п.в} c_p} =$$

$$= 104 + \frac{0,1 \cdot 10,305 (628,5 - 167,5) + 0,1 \cdot 9,695 (564,4 - 167,5)}{1,1 \cdot 20 \cdot 4,19} = 113,3^\circ \text{ C.}$$

Расчет охладителя конденсата:

$$W_{п.в} (h'_{п.в} - h'_{o.п}) = D_{отб} (h'_{отб} - h'_x) + D_{н1} (h'_{н1} - h'_x);$$

$$22 (523 - 474) = 10,42 (694 - h'_x) + 10,305 (628,5 - h'_x);$$

$$1078 \cdot 10^3 = 7231,48 \cdot 10^3 - 10,42 \cdot 10^3 h'_x + 6533,25 \cdot 10^3 - 10,305 \cdot 10^3 h'_x;$$

$$20,725 \cdot 10^3 h'_x = 12685,73 \cdot 10^3; h'_x = 612,14 \text{ кДж/кг}; t_x = 146^\circ \text{ C.}$$

Задача 4.17. По исходным данным задачи 4.16 рассчитать двухступенчатую испарительную установку с последовательным питанием (рис. 4.10). Продувку второй ступени принять 20% ее производительности.

Ответ: $D_{отб} = 10,7 \text{ т/ч}$; $D_{н1} = 10,023 \text{ т/ч}$; $D_{н2} = 9,977 \text{ т/ч}$; $W_{п.в} = 21,995 \text{ т/ч}$; энтальпия конденсата, сливаемого в деаэратор, $h'_x = 608,2 \text{ кДж/кг}$.

Задача 4.18. При указанных в задачах 4.16 и 4.17 расходах продувки испарителей определить солесодержание дистиллята в обеих испарительных установках, если принять следующие дополнительные условия: сухость пара во всех ступенях $x = 0,99$. Общее солесодержание химически очищенной воды $c_{x.o.в} = 10 \text{ мг/л}$; растворимость солей в сухом насыщенном паре пренебрежимо мала ($c_n = 0$). Для упрощения расчета производительность всех ступеней испарителей принять одинаковой и равной $D_n = 10 \text{ т/ч}$.

Решение. Установка с параллельным питанием. Коэффициент упаривания в ступени $\omega = \frac{W_{п.в}}{D_{прод}} = \frac{10 \cdot 1,1}{0,1 \cdot 10} = 11$; концентрация солей в продувочной воде испарителя $c_{прод} = c_{x.o.в} \omega = 10 \cdot 11,0 = 110 \text{ мг/л}$.

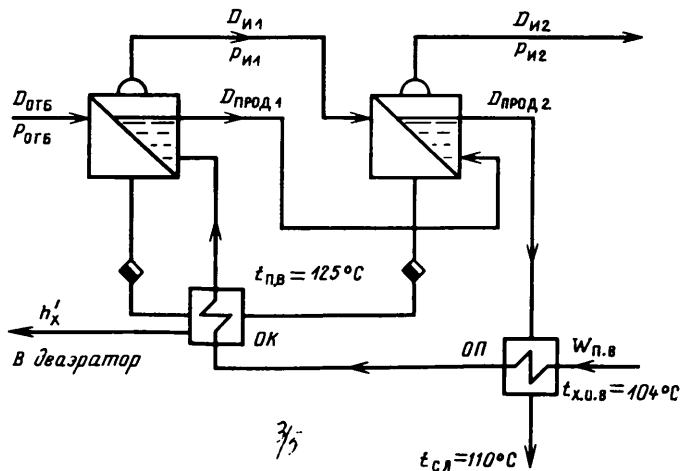


Рис. 4.10. Двухступенчатая испарительная установка с последовательным питанием:

ОК — охладитель конденсата; ОП — охладитель продувки

Солесодержание дистиллята

$$c_{\text{дис}} = \frac{c_{\text{п}} \cdot 99 + c_{\text{прод}} \cdot 1}{100} = \frac{0,0 + 110 \cdot 1}{100} = 1,1 \text{ мг/л.}$$

Поскольку продувка ступеней одинакова, то солесодержание дистиллята в установке в целом равно солесодержанию дистиллята в ступени:

$$c_{\text{дис}}^{\text{пар}} = 1,1 \text{ мг/л.}$$

Установка с последовательным питанием. Коэффициент упаривания в первой ступени $\omega_1 = \frac{W_{\text{п.в}1}}{D_{\text{прод}1}} = \frac{22}{12} = 1,83$. Солесодержание продувочной воды первой ступени $c_{\text{прод}1} = c_{\text{х.о.в}} \omega_1 = 10,0 \cdot 1,83 = 18,3 \text{ мг/л.}$

Коэффициент упаривания во второй ступени $\omega_2 = \frac{W_{\text{п.в}2}}{D_{\text{прод}2}} = \frac{12}{2} = 6$. Солесодержание продувочной воды второй ступени $c_{\text{прод}2} = c_{\text{прод}1} \omega_2 = 18,3 \cdot 6 = 109,8 \text{ мг/л.}$

Солесодержание дистиллята в первой ступени

$$c_{\text{дис}1} = c_{\text{п}} \cdot 0,99 + c_{\text{прод}1} \cdot 0,01 = 0 + 18,3 \cdot 0,01 = 0,183 \text{ мг/л.}$$

Солесодержание дистиллята во второй ступени

$$c_{\text{дис}2} = c_{\text{п}} \cdot 0,99 + c_{\text{прод}2} \cdot 0,01 = 0 + 109,8 \cdot 0,01 = 1,098 \text{ мг/л.}$$

Общее солесодержание дистиллята в испарительной установке

$$c_{\text{дис}} = \frac{0,184 + 1,098}{2} = 0,64 \text{ мг/л.}$$

Таким образом, качество дистиллята в испарительной установке с последовательным питанием выше, чем в установке с параллельным питанием.

Задача 4.19. Определить выход сухого насыщенного пара в двух-ступенчатой бесповерхностной испарительной установке при утилизации теплоты загрязненного конденсата с целью получения дистиллята и горячей воды на коммунально-бытовые цели (рис. 4.11). Данные для расчета: расход загрязненного конденсата $G_{\text{з.к}} = 8,0 \text{ т/ч}$; температура загрязненного конденсата $t_{\text{з.к}} = 100^\circ \text{С}$. Расход водопроводной воды равен расходу загрязненного конденсата; температура холодной водопроводной воды $t_{\text{х}} = 5^\circ \text{С}$; температура горячей воды $t_{\text{г}} = 65^\circ \text{С}$. Недогрев охлаждающей (в свою очередь нагреваемой) воды в ступенях испарения $\theta = 5^\circ \text{С}$. Потерями теплоты в окружающую среду пренебречь.

Решение. Температура насыщения в первой ступени испарителя $t_{\text{н}1} = t_{\text{г}} + \theta = 65 + 5 = 70^\circ \text{С}$. По этой температуре с помощью таблиц водяного пара находим $p_{\text{н}1} = 0,032 \text{ МПа}$; энтальпия сухого насыщенного пара $h''_1 = 2628 \text{ кДж/кг}$; теплота конденсации $r_1 = 2335 \text{ кДж/кг}$. Перепад температур насыщения в 1-й ступени $\Delta t_{\text{ст}1} = t_{\text{з.к}} - t_{\text{н}1} = 100 - 70 = 30^\circ \text{С}$.

Для второй ступени принимается перепад температур насыщения таким же, как и в первой ступени: $\Delta t_{\text{ст}2} = 30^\circ \text{С}$. Тогда $t_{\text{н}2} = t_{\text{н}1} - \Delta t_{\text{ст}2} =$

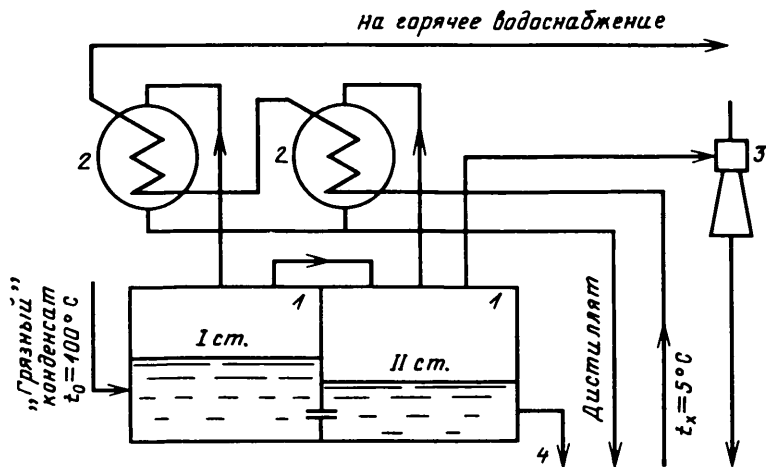


Рис. 4.11. Двухступенчатая бесповерхностная испарительная установка: 1—ступень испарителя; 2—конденсатор-подогреватель; 3—эжектор; 4—рассол

$= 70 - 30 = 40^\circ \text{C}$. По $t_{н2}$ находим $p_{н2} = 0,0076 \text{ МПа}$; $h''_2 = 2576 \text{ кДж/кг}$; $r_2 = 2407 \text{ кДж/кг}$. Температура воды на выходе из второй ступени испарения $t_2 = t_{н2} - \theta = 40 - 5 = 35^\circ \text{C}$. Удельный расход холодной воды находится из выражения [5]

$$g_x = \frac{G_x}{G_{\text{дис}}} = \frac{1}{n} \left[\frac{r_{\text{ср}}(n+1)}{(t_{3,x} - t_x - \theta)c_p} + \frac{n-1}{2} \right],$$

где G_x —расход холодной воды, равный расходу загрязненного конденсата; $r_{\text{ср}}$ —среднее значение теплоты конденсации пара, кДж/кг ; n —число ступеней испарения; c_p —теплоемкость воды, $\text{кДж/(кг} \cdot \text{K)}$:

$$g_x = \frac{1}{2} \left[\frac{2371(2+1)}{(100-5-5) \cdot 4,19} + \frac{2-1}{2} \right] = 9,68 \text{ кг/кг дистиллята.}$$

$$g_{\text{дис}} = \frac{G_{\text{дис}}}{G_{3,x}} = \frac{1}{g_x} = \frac{1}{9,68} = 0,103 \frac{\text{кг дистиллята}}{\text{кг загрязненного конденсата}}.$$

$$G_{\text{дис}} = g_{\text{дис}} \cdot G_{3,x} = 0,103 \cdot 8000 = 826,4 \text{ кг/ч.}$$

Выход рассола из установки $G_{\text{прод}} = G_{3,x} - G_{\text{дис}} = 8000 - 826,4 = 7173,6 \text{ кг/ч.}$

Задача 4.20. Определить расход пара из отбора турбины $D_{\text{отб}}$ для получения сухого насыщенного пара в паропреобразователе в количестве $D_{\text{п}} = 30 \text{ т/ч}$ с давлением $p_{\text{п}} = 0,784 \text{ МПа}$. Давление и температура отборного пара $p_{\text{отб}} = 1,176 \text{ МПа}$; $t_{\text{отб}} = 287^\circ \text{C}$. Продувка паропреобразователя $\alpha_{\text{прод}} = 15\%$ его производительности. Продувочная вода после охладителя продувки с температурой $t_{\text{сл}} = 50^\circ \text{C}$ сливается в дренаж. Конденсат отборного пара после охладителя конденсата направляется в деаэрактор (рис. 4.12). Температура химически очищенной воды $t_{\text{х.о.в}} = 30^\circ \text{C}$; КПД паропреобразователя $\eta_{\text{т.в}} = 0,98$. В ходе

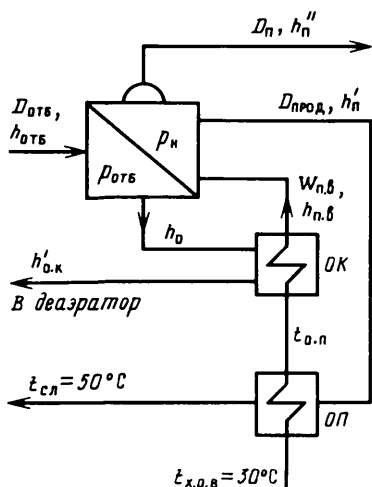


Рис. 4.12. Принципиальная тепловая схема паропреобразовательной установки: ОК—охладитель конденсата; ОП—охладитель продувки

расчета паропреобразователя определить энтальпию конденсата $h'_{о.к}$, поступающего в деаэратор.

Решение. Расход питательной воды паропреобразователя $W_{п.в} = D_n + D_{прод} = 1,15 D_n = 1,15 \cdot 30 = 34,5$ т/ч. Энтальпия продувочной воды $h'_{прод} = 718$ кДж/кг (по таблицам при давлении насыщения $p_n = 0,784$ МПа). Из уравнения теплового баланса охладителя продувки находим энтальпию питательной воды после охладителя продувки:

$$h'_{о.п} = h'_{х.о.в} + \frac{\eta_{о.п} (h'_{прод} - h'_{с.л})}{W_{п.в}} D_{прод} = 125,7 + \frac{0,98 (718 - 209)}{34,5} \cdot 4,5 = 190,76 \text{ кДж/кг.}$$

Составляем уравнение теплового баланса паропреобразователя:

$$D_{отб} (h_{отб} - h'_{отб}) \eta_n = W_{п.в} (h'_n - h'_{п.в}) + D_n (h''_n - h'_n);$$

отсюда

$$D_{отб} = \frac{W_{п.в} (h'_n - h'_{п.в}) + D_n (h''_n - h'_n)}{(h_{отб} - h'_{отб}) \eta_{т.а}};$$

$h_{отб} = 3018$ кДж/кг; $h'_{отб} = 795$ кДж/кг (по таблицам воды и водяного пара при $p_{отб} = 1,176$ МПа и $t_{отб} = 287^\circ \text{C}$);

$$h''_n = 2770 \text{ кДж/кг; } h'_n = h'_{прод} = 718 \text{ кДж/кг.}$$

Принимаем температуру питательной воды на входе в паропреобразователь на 15°C ниже температуры насыщения вторичного пара:

$$t_{п.в} = t_n - 15 = 169,6 - 15 = 154,6^\circ \text{C; } h'_{п.в} = 647 \text{ кДж/кг;}$$

$$D_{отб} = \frac{34,5 (718 - 647) + 30 (2770 - 718)}{(3018 - 795) \cdot 0,98} = 29,38 \text{ т/ч.}$$

Уравнение теплового баланса охладителя конденсата

$$D_{отб} (h'_{отб} - h'_{о.к}) \eta_{о.к} = W_{п.в} (h'_{п.в} - h'_{о.п});$$

$$h'_{о.к} = h'_{отб} - \frac{W_{п.в} (h'_{п.в} - h'_{о.п})}{D_{отб} \eta_{о.к}} = 795 - \frac{34,5 (647 - 191)}{29,38 \cdot 0,98} = 546,39 \text{ кДж/кг;}$$

$$t_{о.к} = \frac{h'_{о.к}}{c_p} = \frac{546,39}{4,19} = 130,4^\circ \text{C.}$$

Задача 5.1. Определить показатели режима работы промышленной ТЭЦ с тремя турбинами ПТ-135-130, если агрегаты ТЭЦ выработали $\mathcal{E}_{\text{год}} = 2,75$ млрд. кВт·ч/год и отпустили промышленным потребителям $D_{\text{пр}}^{\text{год}} = 4 \cdot 10^6$ т/год пара из отбора П и $Q_{\text{от}} = 5,866 \cdot 10^6$ ГДж/год из отопительных отборов. На собственные нужды ТЭЦ израсходовано $\mathcal{E}_{\text{с.н}} = 197$ млн. кВт·ч/год. Турбогенераторы находились в работе $\tau_1 = 8325$ ч; $\tau_2 = 8441$ ч; $\tau_3 = 7939$ ч.

Решение. Число машино-часов турбогенераторов [10]

$$m = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 = 8325 + 8441 + 7939 = 24\,705.$$

Время работы ТЭЦ в году обычно принимают без останова всех агрегатов ТЭЦ $\tau_{\text{ст}} = 8760$ ч.

Средний коэффициент загрузки агрегата

$$f_{\text{ср}} = \frac{\mathcal{E}_{\text{год}}}{m N_{\text{н}}} = \frac{2,75 \cdot 10^9}{24\,705 \cdot 135 \cdot 10^3} = 0,825.$$

Средняя нагрузка ТЭЦ

$$N_{\text{ТЭЦ}}^{\text{ср}} = \frac{\mathcal{E}_{\text{год}}}{8760} = \frac{2,75 \cdot 10^9}{8760} = 314 \cdot 10^3 \text{ кВт}.$$

Установленная мощность ТЭЦ

$$N_{\text{уст}} = z \cdot N_{\text{н}} = 3 \cdot 135 \cdot 10^3 = 405 \cdot 10^3 \text{ кВт},$$

где z — количество агрегатов на ТЭЦ; $N_{\text{н}}$ — номинальная мощность агрегата.

Коэффициент использования установленной мощности ТЭЦ

$$k_{\text{н}} = \frac{\mathcal{E}_{\text{год}}}{N_{\text{уст}} \cdot 8760} = \frac{N_{\text{ср}}}{N_{\text{уст}}} = \frac{314 \cdot 10^3}{405 \cdot 10^3} = 0,775.$$

Коэффициент рабочего времени агрегатов

$$k_{\text{в}} = \frac{m}{z \cdot 8760} = \frac{24\,705}{3 \cdot 8760} = 0,940.$$

Коэффициент установленной мощности $k_{\text{н}}$ можно определять также по формуле

$$k_{\text{н}} = f_{\text{ср}} \cdot k_{\text{в}} = 0,825 \cdot 0,940 = 0,775.$$

Доля собственных нужд в выработке электрической энергии ТЭЦ

$$k_{\text{с.н}} = \frac{\mathcal{E}_{\text{с.н}}}{\mathcal{E}_{\text{год}}} = \frac{197 \cdot 10^6}{2,75 \cdot 10^9} = 0,0715 \text{ или } 7,15\%.$$

Средний отпуск пара из промышленного отбора

$$D_{\text{пр}}^{\text{ср}} = \frac{D_{\text{пр}}^{\text{год}}}{m} = \frac{4 \cdot 10^6}{24 \cdot 705} = 156 \text{ т/ч.}$$

Номинальный промышленный отбор у турбины ПТ-135-130 равен 320 т/ч [2]. Поэтому средняя загрузка промышленного отбора

$$\beta_{\text{пр}} = \frac{D_{\text{пр}}^{\text{ср}}}{D_{\text{пр}}^{\text{н}}} = \frac{156}{320} = 0,507.$$

Аналогично средняя загрузка отопительного отбора при номинальном его значении $Q_{\text{от}}^{\text{н}} = 335,2 \text{ ГДж/ч} \approx 93 \text{ МВт}$

$$\beta_{\text{от}} = \frac{Q_{\text{от}}^{\text{год}}}{m Q_{\text{от}}^{\text{н}}} = \frac{5,866 \cdot 10^6}{24 \cdot 705 \cdot 335,2} = 0,708.$$

Задача 5.2. Определить число машино-часов работы промышленной ТЭЦ с четырьмя турбинами ПТ-60-130, если коэффициент использования установленной мощности $k_{\text{н}} = 0,87$, а средняя нагрузка агрегата составила $N_{\text{ср}} = 56,5 \text{ МВт}$.

Ответ: $m = 32 \cdot 373 \text{ ч}$.

Задача 5.3. Определить среднюю мощность агрегатов станции с турбинами Т-100-130, если $k_{\text{н}} = 0,72$, а $k_{\text{в}} = 0,85$.

Ответ: $N_{\text{ср}} = 84,7 \text{ МВт}$.

Задача 5.4. Определить, успеет ли ремонтный персонал отремонтировать три турбоагрегата ТЭЦ Т-100-130 за год, если по условиям отпуска теплоты ремонт следует проводить только вне отопительного периода, а на летнее время ($\tau_{\text{лет}} = 2300 \text{ ч}$) запланирована средняя нагрузка ТЭЦ $N_{\text{ср.ст}} = 200 \text{ МВт}$. На ремонт одного агрегата отводится 360 ч.

Решение. Время, необходимое для ремонта трех агрегатов станции, составит $\tau_{\text{рем}} = 360 \times 3 = 1080 \text{ ч}$.

Выработка ТЭЦ за летний период должна составить

$$\mathcal{E}_{\text{лет}} = N_{\text{ср.ст}} \tau_{\text{лет}} = 200 \cdot 10^3 \cdot 2300 = 460 \cdot 10^6 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Необходимое количество машино-часов для летней выработки

$$m_{\text{лет}} = \mathcal{E}_{\text{лет}} / N_{\text{н}} = 4600 \text{ ч}.$$

Число машино-часов, свободное от ремонта, за летнее время

$$m_{\text{св}} = 3\tau_{\text{лет}} - \tau_{\text{рем}} = 3 \cdot 2300 - 1080 = 5820 \text{ ч}.$$

Следовательно, ремонт за летнее время всех агрегатов ТЭЦ провести можно ($4600 < 5820$).

Задача 5.5. Определить, как изменится коэффициент средней загрузки агрегатов, если $k_{\text{н}}$ увеличился с 0,75 до 0,82, а $k_{\text{в}}$ увеличился с 0,90 до 0,93.

Ответ: $f_{\text{ср}}$ увеличится с 0,833 до 0,881.

Задача 5.6. Определить расход пара на турбину Т-100-130 в следующем режиме: $N_{\text{т}} = 100 \text{ МВт}$; отпуск теплоты из отборов $Q_{\text{от}} = 628,5 \text{ ГДж/ч} = 174,5 \text{ МВт}$; температура сетевой воды после подогревателей равна $t_{\text{н}} = 120^\circ \text{С}$, что соответствует давлению в отборе $p_{\text{от}} = 0,25 \text{ МПа}$; давление в конденсаторе турбины $p_{\text{к}} = 4 \text{ кПа}$.

Решение. Расход пара на турбину в заданном режиме работы можно определить двумя методами. Первый метод—аналитический, предполагающий, что известен процесс расширения пара в проточной части турбины по данным испытаний. Следовательно, известны энтальпии пара в характерных точках процесса в турбине и расход пара определяют по формуле [10]

$$D_T = k_{\text{рег}} \left(\frac{N_3}{(h_0 - h_k) \eta_{\text{зм}}} + y_{\text{от}} D_{\text{от}} \right),$$

где $k_{\text{рег}}$ —коэффициент регенерации, который либо определяют по аналитическому выражению [1], либо принимают по данным эксплуатации; для данного режима принимают $k_{\text{рег}} = 1,2$; N_3 —электрическая мощность турбины, кВт; h_0 и h_k —начальная и конечная энтальпия пара в турбине; по данным испытаний при номинальных параметрах пара $p_0 = 13$ МПа; $t_0 = 555^\circ \text{C}$ и при $p_k = 4$ кПа; $h_0 = 3480$ кДж/кг; $h_k = 2240$ кДж/кг; $\eta_{\text{зм}} = 0,985$ для Т-100-130; $y_{\text{от}} = \frac{h_{\text{от}} - h_k}{h_0 - h_k}$ —коэффициент недовыработки мощности паром отопительного отбора; здесь $h_{\text{от}} = 2670$ кДж/кг (при $p_{\text{от}} = 0,20$ МПа):

$$y_{\text{от}} = \frac{2670 - 2240}{3480 - 2240} = 0,347;$$

$D_{\text{от}}$ —расход в отопительный отбор, который находят по заданному отпуску теплоты $Q_{\text{от}} = 174,5$ МВт:

$$D_{\text{от}} = \frac{Q_{\text{от}}}{h_{\text{от}} - h'_{\text{от}}} = \frac{174,5 \cdot 10^3}{2670 - 503} = 80,5 \text{ кг/с}.$$

Здесь $h'_{\text{от}}$ —энтальпия конденсата греющего пара отбора при давлении $p_{\text{от}} = 0,2$ МПа по [11]: $h'_{\text{от}} = 503$ кДж/кг;

$$D_T = 1,2 \left(\frac{100 \cdot 10^3}{3480 - 2240} + 0,347 \cdot 80,5 \right) = 129 \text{ кг/с} = 464,4 \text{ т/ч}.$$

Более просто и с большей точностью можно решить задачу вторым методом с помощью диаграммы режимов турбины Т-100-130. По диаграмме режимов, представленной на рис. 5.1, находят тепловую нагрузку $Q_{\text{от}} = 150$ Гкал/ч (174,4 МВт) слева от основной диаграммы по оси абсцисс (точка А). Затем проводят вертикаль от этой нагрузки до пересечения с кривой, соответствующей заданной температуре сетевой воды $t_n = 120^\circ \text{C}$ после сетевых подогревателей (точка Б). Через точку Б проводят горизонталь вправо до пересечения в основном поле диаграммы режимов с кривой, соответствующей той же температуре сетевой воды $t_n = 120^\circ \text{C}$ (точка В). Далее от точки В проводят прямую СК, параллельную вспомогательным линиям в поле диаграммы режимов до пересечения с вертикальным, проходящей через заданную электрическую мощность (точка Г). От точки Г проводят горизонтальную линию вправо до пересечения с осью, показывающей расходы пара на турбину (точка Е). Находят, что расход пара (точка Е) равен $D_T = 470$ т/ч или 130,5 кг/с. Расхождение с ранее полученным значением $D_T = 129$ кг/с составляет:

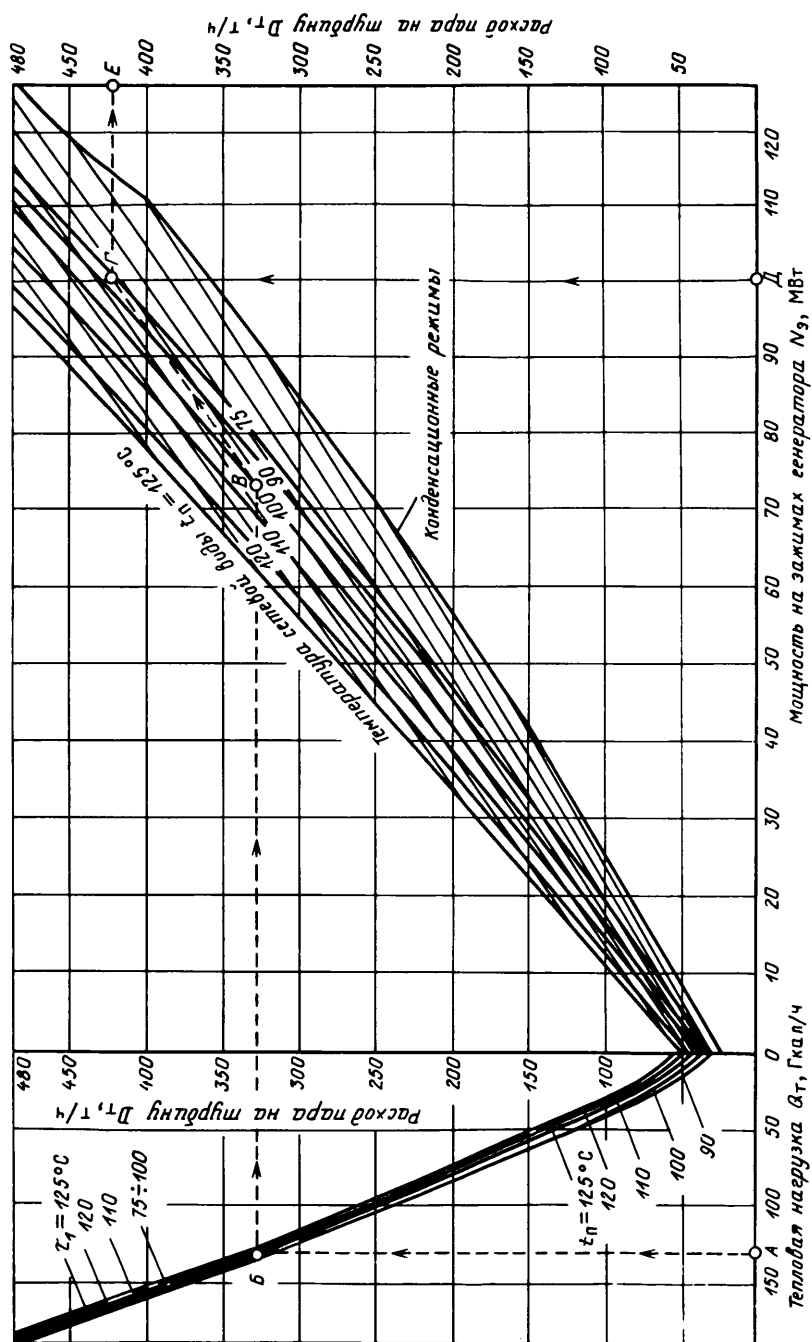


Рис. 5.1. Диаграмма режимов турбины Т-100-130 при работе с двумя отборами пара

$$\Delta = \frac{D_T - D'_T}{D_T} \cdot 100 = \frac{130,5 - 129}{130,5} \cdot 100 = 1,15\%.$$

Такое расхождение для большинства расчетов считают допустимым. Расчет по диаграмме режимов турбин всегда предпочтительнее, так как диаграмма строится по данным испытаний турбин этого типа. Расчет по диаграмме режимов нагляднее и проще, а также лучше демонстрирует возможные предельные режимы турбин по тепловой и электрической нагрузке.

Задача 5.7. Определить расход пара на турбину Т-100-130, пользуясь диаграммой режимов при следующих условиях: $Q_{от} = 544,7$ ГДж/ч (130 Гкал/ч); $N_s = 95$ МВт; температура сетевой воды за подогревателем $t_n = 110$ °С.

Ответ: $D_T = 423$ т/ч = 117,5 кг/с.

Задача 5.8. Определить электрическую мощность турбины Т-100-130 при заданном расходе пара $D_T = 450$ т/ч; $Q_{от} = 628,5$ ГДж/ч (150 Гкал/ч); $t_n = 120$ °С. Решить задачу, пользуясь диаграммой режимов.

Ответ: $N_s = 94$ МВт.

Задача 5.9. Определить полный часовой и удельные расходы условного топлива на ТЭЦ с турбиной Т-100-130, работающей в следующем режиме: $N_s = 102$ МВт; $Q_{от} = 670,4$ ГДж/ч (160 Гкал/ч); $t_n = 120$ °С.

Решение. По диаграмме режимов Т-100-130 находим тем же методом, что и в задаче 5.6, расход пара в заданном режиме $D_T = 485$ т/ч = 135 кг/с. По кривой справа от основной диаграммы, представляющей зависимость $t_{п.в} = \psi(D_T)$, находят для $D_T = 485$ т/ч $t_{п.в} = 232$ °С. Начальную энтальпию пара находят по h, s -диаграмме; как и в задаче 5.6, $h_0 = 3480$ кДж/кг. По таблицам [11] находим энтальпию питательной воды на входе в котельную по давлению питательной воды $p_{п.в} = 1,25$ МПа и $t_{п.в} = 232$ °С; $h_{п.в} = 1000$ кДж/кг.

Расход топлива для котла на ТЭЦ с учетом $\eta_{к.у} = 0,89$; $Q_{п}^* = 29\,330$ кДж/кг (условное топливо) и КПД теплового потока, учитывающего потери теплоты на пути от котла до турбины, $\eta_{т.п} = 0,98$ находят по формуле [10]

$$B_{ТЭЦ} = \frac{D_T(h_0 - h_{п.в})}{Q_{п}^* \eta_{к.у} \eta_{т.п}} = \frac{485 \cdot 10^3 (3480 - 1000)}{29\,330 \cdot 0,89 \cdot 0,98} = 47 \cdot 10^3 \text{ кг/ч.}$$

В соответствии с методом МЭС разделяют все топливо между электроэнергией и отпущенной теплотой, для чего находят топливо, необходимое для производства теплоты:

$$B_T = \frac{Q_{отп}}{Q_{п}^* \eta_{к.у}} = \frac{160 \cdot 10^6 \cdot 4,19}{29\,330 \cdot 0,89} = 25,7 \cdot 10^3 \text{ кг/ч.}$$

Топливо, пошедшее на выработку электроэнергии, находится как разница между $B_{ТЭЦ}$ и B_T :

$$B_{э.э} = B_{ТЭЦ} - B_T = (47 - 25,7) \cdot 10^3 = 21,3 \cdot 10^3 \text{ кг/ч.}$$

Выработку электроэнергии находят по электрической мощности:

$$\mathcal{E}_{выр} = N_s \tau = 102 \cdot 10^3 \cdot 1 = 102 \cdot 10^3 \text{ кВт} \cdot \text{ч.}$$

Время работы установки τ принимают равным 1 ч.

Удельный расход топлива на производство 1 кВт·ч электроэнергии находят по формуле

$$b_{3,3} = \frac{B_{3,3}}{Э_{\text{выр}}} = \frac{21 \cdot 3 \cdot 10^3}{102 \cdot 10^3} = 0.209 \text{ кг/(кВт} \cdot \text{ч)}.$$

Удельный расход топлива на производство теплоты

$$b_{\tau} = \frac{B_{\tau}}{Q_{\text{отп}}} = \frac{25,7 \cdot 10^3}{160} = 155,4 \text{ кг/Гкал} = 38,4 \text{ кг/ГДж}.$$

Задача 5.10. Определить удельные расходы условного топлива на ТЭЦ с турбиной Т-250-240 в следующем режиме работы: $N_3 = 227$ МВт; $Q_{\text{от}} = 1257$ ГДж/ч (300 Гкал/ч); $p_{\text{от}} = 0,15$ МПа; $\eta_{\text{к.у}} = 0,89$; $\eta_{\text{т.п}} = 0,98$; $Q_{\text{н}}^{\text{п}} = 29\,330$ кДж/кг; $\Delta h_{\text{п.п}} = 670$ кДж/кг — повышение энтальпии в промежуточном перегревателе пара; $h_0 = 3360$ кДж/кг.

Ответ: $b_3 = 0,23$ кг/(кВт·ч); $b_{\tau} = 163,3$ кг/Гкал = 38,9 кг/ГДж.

Задача 5.11. Определить удельные расходы условного топлива на ТЭЦ с турбиной Т-250-240 с учетом отклонения параметров процесса от номинальных в следующем режиме работы: расход пара на турбину $D_{\tau} = 900$ т/ч; $Q_{\text{от}} = 1257$ ГДж/ч (300 Гкал/ч), давление в верхнем отопительном отборе $p_{\text{от}} = 0,12$ МПа, параметры свежего пара $p_0 = 23,2$ МПа, $t_0 = 550^{\circ}\text{C}$; температура пара после промежуточного перегрева $t_{\text{п.п}} = 550^{\circ}\text{C}$, температура охлаждающей воды для конденсатора турбины $t_{\text{охл}} = 10^{\circ}\text{C}$; $\eta_{\text{к.у}} = 0,89$; $\eta_{\text{т.п}} = 0,98$; $Q_{\text{н}}^{\text{п}} = 29\,330$ кДж/кг; $\Delta h_{\text{п.п}} = 700$ кДж/кг.

Решение. Пользуясь диаграммой режимов турбины Т-250-240 [2], находим по D_{τ} , $Q_{\text{от}}$ и $t_{\text{п}}$ электрическую мощность, выполняя построения, аналогичные проведенным в задаче 5.9: $N_3 = 235$ МВт. Эту мощность турбина развивала бы в том случае, если бы параметры пара были номинальными, т. е. $p_0 = 23,6$ МПа; $t_0 = 540^{\circ}\text{C}$; $t_{\text{п.п}} = 540^{\circ}\text{C}$; $p_{\text{от}} = 0,12$ МПа; $t_{\text{охл}} = 20^{\circ}\text{C}$. В заданном в задаче режиме параметры отличаются от номинальных, за исключением $p_{\text{от}} = 0,12$ МПа = $p_{\text{от}}^{\text{н}}$. Поэтому фактическая мощность турбины определяется с учетом поправок на отклонение параметров от номинальных. Поправки приведены в приложении к диаграмме режимов. Важно правильно определить знак каждой поправки, для этого рассмотрим метод нахождения поправок и их знака. Поправку к мощности на начальное давление пара необходимо ввести, так как в заданном режиме $p_0 = 23,2$ МПа ниже, чем номинальное значение $p_0 = 23,6$ МПа. По кривой поправок находим при $D_{\tau} = 900$ т/ч $\Delta N = 0,42$ МВт. Давление свежего пара ниже номинального, следовательно, при заданном расходе пара турбина развивает мощность меньшую, чем при номинальных параметрах. Поэтому поправка берется со знаком минус, т. е. фактическая мощность

$$N_3 - \Delta N_{p_0} = 235 - 0,42 = 234,58 \text{ МВт}.$$

Определяем поправку к мощности для начальной температуры, которая выше нормы: $t_0^{\text{н}} = 540^{\circ}\text{C}$; в заданном режиме $t_0 = 550^{\circ}\text{C}$, поэтому располагаемое теплопадение в турбине больше. Следовательно, при заданном расходе пара $D_{\tau} = 900$ т/ч будет получена добавочная

мощность. По поправочным кривым находим ΔN при $t_0 = 550^\circ \text{C}$ и $D_1 = 900 \text{ т/ч}$ $\Delta N = 2 \text{ МВт}$.

Таким образом, с учетом поправки на отклонение t_0 фактическая мощность турбины

$$N_\phi = 234,58 + 2 = 236,58 \text{ МВт.}$$

Аналогично находим поправку к мощности на температуру промежуточного перегрева, которая в заданном режиме равна $t_{п.п} = 550^\circ \text{C}$, что выше нормы $t_{п.п}^н = 540^\circ \text{C}$, поэтому найденную поправку к мощности также следует брать со знаком плюс. Поправка $\Delta N = 1,8 \text{ МВт}$, а фактическая мощность $N_\phi = 236,58 + 1,8 = 238,38 \text{ МВт}$.

Далее вводим поправку к мощности на температуру охлаждающей воды $t_{охл} = 10^\circ \text{C}$, которая в заданном режиме меньше нормативной $t_{охл}^н = 20^\circ \text{C}$. Здесь следует брать поправку к мощности также со знаком плюс, так как снижение температуры охлаждающей воды обычно позволяет снизить давление в конденсаторе турбины, что увеличит располагаемый перепад и повысит мощность турбины.

По кривым поправок на $t_{охл}$ находим $\Delta N = 2,1 \text{ МВт}$, тогда $N_\phi = N_s + \Delta N = 238,38 + 2,1 = 240,48 \text{ МВт}$.

Так как давление отопительного отбора в заданном режиме совпадает с номинальным $p_{отб} = 0,12 \text{ МПа}$, то поправка здесь не вводится ($\Delta N = 0$). Таким образом, с учетом всех поправок фактическая мощность турбины N_ϕ будет равна $240,48 \text{ МВт}$, т. е. эта мощность увеличилась с учетом поправок на $\Delta N = 5,48 \text{ МВт}$, что составляет 2,33% по сравнению с первоначальной мощностью без поправок $N_s = 235 \text{ МВт}$.

Далее находим по вспомогательной кривой на диаграмме режимов $t_{п.в}$ по D_1 : $t_{п.в} = 260^\circ \text{C}$.

По таблицам свойств водяного пара [11] находим при $t_{п.в} = 260^\circ \text{C}$ и $p_{к.у} = 30 \text{ МПа}$ $h_{п.в} = 1135 \text{ кДж/кг}$.

Далее решение задачи проводим аналогично задаче 5.9 только с учетом дополнительных затрат теплоты на промежуточный перегрев (с учетом $\Delta h_{п.п} = 700 \text{ кДж/кг}$):

$$B_{ТЭЦ} = \frac{D_1(h_0 - h_{п.в} + \Delta h_{п.п})}{Q_{п} \eta_{к.у} \eta_{Т.п}} = \frac{900 \cdot 10^3 (3360 - 1135 + 700)}{29 \cdot 330 \cdot 0,89 \cdot 0,98} = 103 \cdot 10^3 \text{ кг/ч} = 103 \text{ т/ч};$$

$$B_T = \frac{Q_{от}}{Q_{п} \eta_{к.у}} = \frac{300 \cdot 10^6 \cdot 4,19}{29 \cdot 330 \cdot 0,89} = 48,2 \cdot 10^3 \text{ кг/ч} = 48,2 \text{ т/ч};$$

$$B_3 = B_{ТЭЦ} - B_T = 103 - 48,2 = 54,8 \text{ т/ч};$$

$$b_3 = \frac{B_3}{N_s \tau} = \frac{54,8 \cdot 10^3}{240,48 \cdot 10^3 \cdot 1} = 0,227 \text{ кг/(кВт} \cdot \text{ч)};$$

$$b_T = \frac{B_T}{Q_{от}} = \frac{48,2 \cdot 10^3}{300} = 160,67 \text{ кг/Гкал} = 38,3 \text{ кг/ГДж}.$$

Задача 5.12. Определить удельные расходы условного топлива на ТЭЦ с турбиной Т-250-240 с учетом поправок в следующем режиме: $N_s = 270 \text{ МВт}$; $Q_{от} = 1089,4 \text{ ГДж/ч}$ (260 Гкал/ч); $p_{от} = 0,09 \text{ МПа}$; $p_0 =$

$= 24,5$ МПа; $t_0 = 545^\circ \text{C}$; $t_{n,n} = 545^\circ \text{C}$; $t_{охл} = 15^\circ \text{C}$; $\Delta h_{n,n} = 690$ кДж/кг; $\eta_{к.у} = 0,89$; $\eta_{т.п} = 0,98$; $Q_n^p = 29\,330$ кДж/кг.

Ответ: $b_2 = 0,225$ кг/(кВт·ч); $b_1 = 38,42$ кг/ГДж.

Задача 5.13. Определить удельные расходы условного топлива на ТЭЦ с турбиной ПТ-135-130 при следующих условиях: $N_3 = 140$ МВт; $D_{пр} = 300$ т/ч; $Q_{от} = 419$ ГДж/ч (100 Гкал/ч); $p_0 = 12,3$ МПа; $t_0 = 560^\circ \text{C}$; $p_{пр} = 1,57$ МПа; $h_{пр} = 2890$ кДж/кг; $p_{от} = 0,1$ МПа; $t_{охл} = 10^\circ \text{C}$; $\eta_{к.у} = 0,90$; $\eta_{т.п} = 0,98$; $Q_n^p = 29\,330$ кДж/кг. Возврат конденсата 50% при $t_v = 75^\circ \text{C}$.

Решение. По диаграмме режимов турбины ПТ-135-130 (рис. 5.2) по $N_3 = 140$ МВт; $Q_{от} = 419$ ГДж/ч и $D_{пр} = 300$ т/ч находим $D_t = 746$ т/ч. Такой расход пара потребовался бы на турбину, если бы все параметры соответствовали расчетным. Для учета отклонений параметров от расчетных (номинальных) требуется определить поправки к расходу пара. По кривым, приложенным к диаграмме режимов, определяют поправку на отклонение начального давления $p_0 = 12,3$ МПа, а номинальное значение $p_0^{\text{ном}} = 12,7$ МПа. $\Delta N = 0,62$ МВт. Поправка берется со знаком плюс, при этом получают фиктивную мощность $N_{фк} = N_3 + \Delta N = 140,62$ МВт. По этой фиктивной мощности находят по диаграмме режимов действительный расход пара, который будет больше предварительно найденного $D_t = 764$ т/ч, так как давление пара ниже расчетного. Рекомендуется определить все поправки к мощности, а затем найти действительный расход пара на турбину. Определяем поправку на температуру свежего пара: так как в заданном режиме начальная температура $t_0 = 560^\circ \text{C}$ ниже, чем номинальная $t_0^{\text{ном}} = 565^\circ \text{C}$, то найденная поправка $\Delta N = 1$ МВт должна приниматься со знаком плюс, чтобы были больше фиктивная мощность, а также действительный расход пара на турбину из-за необходимости компенсировать снижение общего теплопада на турбину вследствие понижения температуры свежего пара. Далее находим поправку к мощности на отклонение давления в промышленном отборе от номинального $p_{пр}^{\text{ном}} = 1,47$ МПа. В заданном режиме $p_{пр} = 1,57$ МПа, т. е. больше, чем номинальное значение, следовательно, до промышленного отбора поток пара срабатывает меньшее теплопадение, вследствие чего потребуется больший расход пара на турбину. Прежде чем находить поправку на $p_{пр}$, необходимо определить по кривым приложения к диаграмме режимов (рис. 5.2) минимально возможное давление в промышленном отборе по найденному предварительно расходу пара $D_t = 746$ т/ч и $D_{пр} = 300$ т/ч. Минимально возможное давление промышленного отбора для этих значений D_t и $D_{пр}$ равно $p_{пр} = 1,42$ МПа, т. е. меньше, чем номинальное давление $p_{пр}^{\text{ном}} = 1,47$ МПа, следовательно, поправку определяют по большему значению $p_{пр} = 1,57$ МПа. Поправка равна $\Delta N = 1,5$ МВт и берется, как ранее пояснялось, со знаком плюс. Если же $p_{пр}^{\text{мин}}$ оказалось больше, чем $p_{пр}$, то поправка равна нулю. Если $p_{пр}^{\text{мин}} > p_{пр}^{\text{ном}} = 1,47$ МПа, а $p_{пр} > p_{пр}^{\text{мин}}$, то поправка определяется как разность поправок при $p_{пр}$ и $p_{пр}^{\text{мин}}$. Находят поправку на температуру охлаждающей воды $t_{охл} = 10^\circ \text{C}$, что ниже номинального значения $t_{охл}^{\text{ном}} = 20^\circ \text{C}$, следовательно, поправку берут со знаком минус, так как располагаемый теплоперепад в турбине больше номинального и требуется меньший расход пара при заданной мощности $N_3 = 140$ МВт. Поправка по кривым при $D_t = 746$ т/ч; $Q_{от} = 419$ ГДж/ч (116,3 МВт) и $D_{пр} = 300$ т/ч равна $\Delta N = -0,8$ МВт. Затем складывают алгебраически все найденные поправки:

$$\Sigma \Delta N = 0,62 + 1,0 + 1,5 - 0,8 = 2,32 \text{ МВт.}$$

Фиктивная мощность

$$N_{\phi} = N_3 \pm \Sigma \Delta N = 140 + 2,32 = 142,32 \text{ МВт.}$$

По этой фиктивной мощности и заданным $Q_{от} = 116,3 \text{ МВт}$ и $D_{пр} = 300 \text{ т/ч}$ находят действительный (с учетом поправок) расход пара по диаграмме режимов турбины ПТ-135-130:

$$D_{\tau} = 749 \text{ т/ч.}$$

По полученному значению $D_{\tau} = 749 \text{ т/ч}$ и $p_{пр} = 1,57 \text{ МПа}$ определяют по вспомогательным кривым $t_{п.в} = 235^{\circ} \text{ С}$. По таблицам свойств водяного пара [11] находят при $t_{п.в} = 235^{\circ} \text{ С}$ и $p_{п.в} = 18 \text{ МПа}$ $h_{п.в} = 1015 \text{ кДж/кг}$. Затем определяем $B_{ТЭЦ}$, B_{τ} , B_3 , b_3 и b_{τ} , как в задачах 5.9 и 5.11:

$$B_{ТЭЦ} = \frac{D_{\tau}(h_0 - h'_{п.в})}{Q_{\text{н}}^p \eta_{к.у} \eta_{т.п}} = \frac{749 \cdot 10^3 (3492 - 1015)}{29 \cdot 330 \cdot 0,90 \cdot 0,98} = 72 \cdot 10^3 \text{ кг/ч} = 72 \text{ т/ч.}$$

$$B_{\tau} = \frac{Q_{от} + Q_{пр}}{Q_{\text{н}}^p \eta_{к.у} \eta_{т.п}} = \frac{(4,19 \cdot 100 + 802,5) \cdot 10^6}{29 \cdot 330 \cdot 0,90 \cdot 0,98} = 4,72 \cdot 10^3 \text{ кг/ч} = 47,2 \text{ т/ч.}$$

Отпуск теплоты из промышленного отбора

$$Q_{пр} = D_{пр}(h_{пр} - h'_{к.с}) = 300 \cdot 10^3 (2890 - 217) = 802,5 \text{ ГДж/ч} (223 \text{ МВт}),$$

где $h'_{к.с}$ — энтальпия смеси конденсата и химически очищенной воды:

$$h'_{к.с} = \varphi_{\text{в}} h'_{\text{в}} + (1 - \varphi_{\text{в}}) h'_{\text{х.о.в}} = 0,5 \cdot 315 + (1 - 0,5) \cdot 127,5 = 217 \text{ кДж/кг};$$

$$B_3 = B_{ТЭЦ} - B_{\tau} = 72 - 47,2 = 24,8 \text{ т/ч};$$

$$b_3 = \frac{B_3}{N_3} = \frac{24,8 \cdot 10^3}{140 \cdot 10^3 \cdot 1} = 0,153 \text{ кг/(кВт} \cdot \text{ч)};$$

$$b_{\tau} = \frac{B_{\tau}}{Q_{от} + Q_{пр}} = \frac{47,2 \cdot 10^3}{419 + 802,5} = 38,7 \text{ кг/ГДж.}$$

Задача 5.14. Пользуясь диаграммой режимов (рис. 5.2), определить удельные расходы топлива на ТЭЦ с турбиной ПТ-135-130 в режиме: $N_3 = 150 \text{ МВт}$; $Q_{от} = 167,6 \text{ ГДж/ч}$ (58,15 МВт); $D_{пр} = 260 \text{ т/ч}$; $p_0 = 13,5 \text{ МПа}$; $t_0 = 545^{\circ} \text{ С}$; $p_{пр} = 1,7 \text{ МПа}$; $h_{пр} = 2800 \text{ кДж/кг}$; $h'_{\text{в.к}} = 230 \text{ кДж/кг}$; $p_{от} = 0,18 \text{ МПа}$; $t_{охл} = 35^{\circ} \text{ С}$; $\eta_{к.у} = 0,83$; $\eta_{т.п} = 0,98$. Теплота сгорания натурального топлива $Q_{\text{н}}^p = 24 \cdot 10^3 \text{ кДж/кг}$.

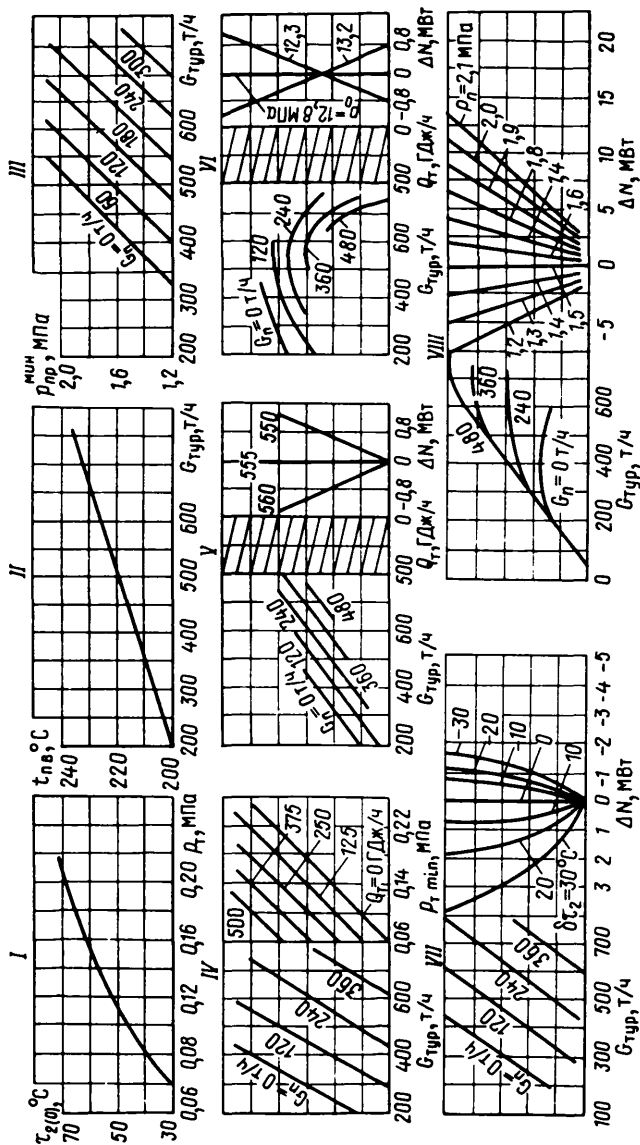
Ответ: $b_3 = 0,238 \text{ кг/(кВт} \cdot \text{ч)}$; $b_{\tau} = 41,5 \text{ кг/ГДж}$.

Задача 5.15. Определить удельные расходы условного топлива на ТЭЦ с турбиной ПТ-135-130 в режиме: $D_{\tau} = 750 \text{ т/ч}$; $D_{пр} = 210 \text{ т/ч}$; $Q_{от} = 377 \text{ ГДж/ч}$ (104,7 МВт); $p_0 = 12,5 \text{ МПа}$; $t_0 = 565^{\circ} \text{ С}$; $p_{пр} = 1,3 \text{ МПа}$; $p_{от} = 0,14 \text{ МПа}$; $h_{пр} = 2810 \text{ кДж/кг}$; $\varphi_{\text{в}} = 0,70$; $t_{\text{в}} = 80^{\circ} \text{ С}$; $t_{\text{х.о.в}} = 30^{\circ} \text{ С}$; $t_{охл} = 25^{\circ} \text{ С}$; $\eta_{к.у} = 0,90$; $\eta_{т.п} = 0,98$; $Q_{\text{н}}^p = 29 \cdot 10^3 \text{ кДж/кг}$.

Ответ: $b_3 = 0,3 \text{ кг/(кВт} \cdot \text{ч)}$; $b_{\tau} = 39 \text{ кг/ГДж}$.

Задача 5.16. Определить удельные расходы условного топлива на ТЭЦ с турбиной ПТ-80-130 в режиме: $N_3 = 75 \text{ МВт}$; $D_{пр} = 200 \text{ т/ч}$; $Q_{от} = 209,5 \text{ ГДж/ч}$; $p_0 = 14 \text{ МПа}$; $t_0 = 550^{\circ} \text{ С}$; $t_{охл} = 12^{\circ} \text{ С}$; $p_{от} = 0,12 \text{ МПа}$; $p_{пр} = 1,4 \text{ МПа}$; $\eta_{к.у} = 0,87$; $\eta_{т.п} = 0,98$; $Q_{\text{н}}^p = 29 \cdot 10^3 \text{ кДж/кг}$; $h'_{\text{в.к}} = 300 \text{ кДж/кг}$; $h_{пр} = 2850 \text{ кДж/кг}$.

Ответ: $b_3 = 0,225 \text{ кг/(кВт} \cdot \text{ч)}$; $b_{\tau} = 39,5 \text{ кг/ГДж}$.



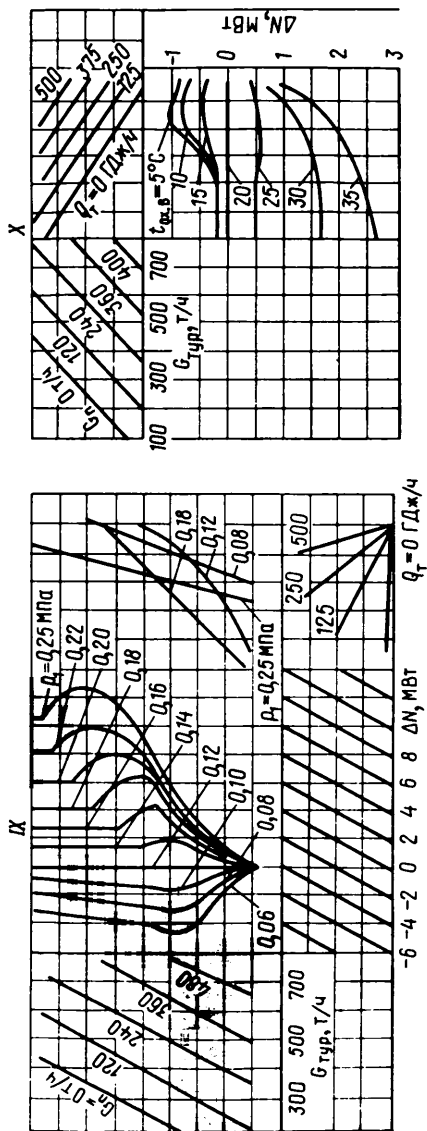


Рис. 5.2. Диаграмма режимов турбины ПТ-135/165-130/15 с поправками: I — температура обратной сетевой воды от давления в отопительном отборе; II — температура питательной воды от расхода пара на турбину; III — минимально возможное давление в промышленном отборе от расхода пара в отбор и на турбину; IV — минимально возможное давление в отопительном отборе; V — поправка на температуру свежего пара; VI — поправка на давление свежего пара; VII — поправка на температуру обратной сетевой воды; VIII — поправка на давление в промышленном отборе; IX — поправка на давление в отопительном отборе; X — поправка на температуру охлаждающей воды

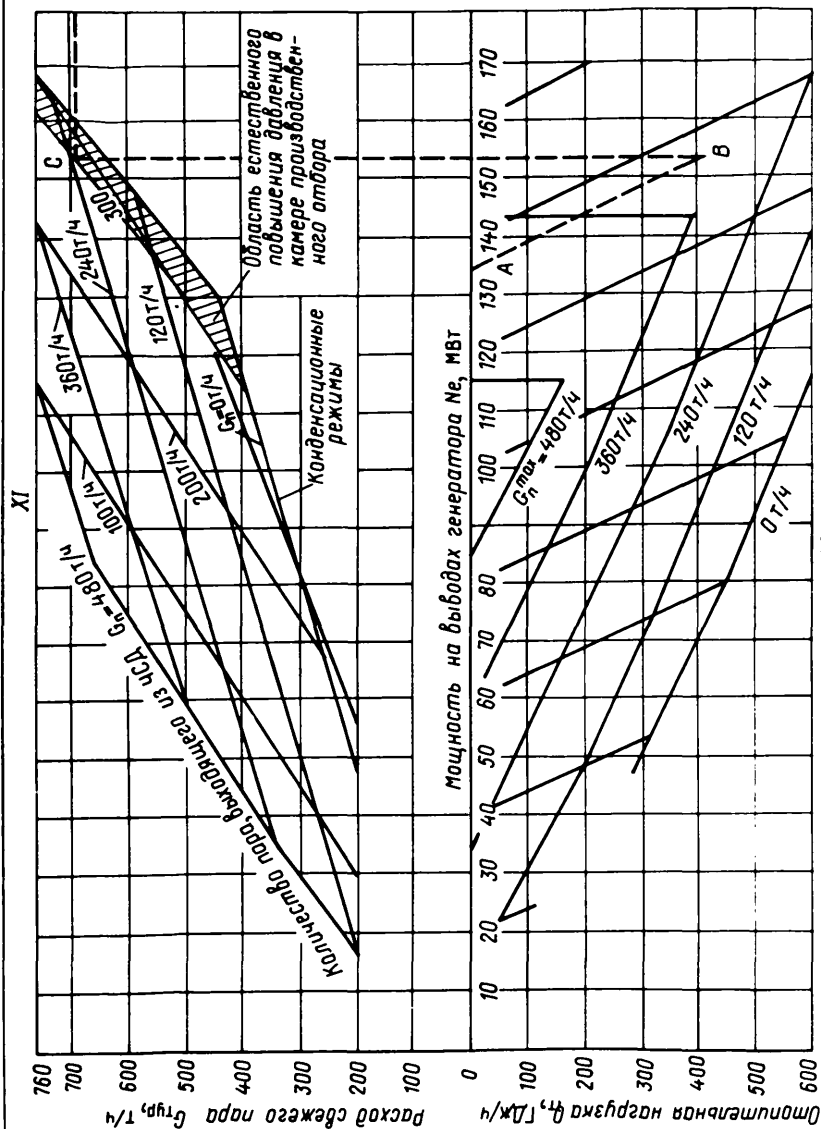


Рис. 5.2

Задача 5.17. Определить удельные и полные расходы топлива и частные КПД ТЭЦ по выработке электроэнергии и теплоты с двумя турбинами Т-105/120-130. ТЭЦ отпускает на отопление, промышленную вентиляцию и горячее водоснабжение $Q_{\text{отп}} = 550$ МВт. Коэффициент теплофикации для ТЭЦ $\alpha_{\text{ТЭЦ}} = 0,65$. Начальные параметры у турбин ТЭЦ расчетные: $p_0 = 12,75$ МПа; $t_0 = 565^\circ \text{C}$. Электрическая мощность ТЭЦ $N_{\text{ТЭЦ}} = 210$ МВт. Среднее давление в отопительных отборах турбин в расчетном режиме $p_r = 0,098$ МПа.

Решение. Задача может быть решена разными методами. Один из них, рассмотренный в задачах 5.6—5.8, базируется на использовании графических материалов по заводской диаграмме режимов турбины Т-105-130. Отсутствие заводской диаграммы, а также стремление к использованию аналитических выражений, особенно удобных при проведении расчетов с помощью ЭВМ, требуют применения других методов решения. Имеются работы [17], в которых дается полное аналитическое описание всех областей диаграммы, однако для многих экономических и проектных задач можно рекомендовать более простой, но менее точный метод, базирующийся на использовании аналитических выражений для энергетических характеристик турбин [17]. В указанной работе приводятся два вида аналитических энергетических характеристик: применяемая для теплофикационных турбин УТМЗ [2] и более общие энергетические характеристики, широко применяемые в технико-экономических расчетах и представленные в табл. 5.1 для основных типов теплофикационных турбин. Энергетическая характеристика для турбины Т-105/120-130 имеет вид (табл. 5.1)

$$Q_{\text{тур}} = 119,7p_r + 2,326N - 1,314N_r + Q_{\text{отп}},$$

где N_r — теплофикационная мощность турбины, МВт; p_r — давление в теплофикационном отборе турбины, МПа; N — общая электрическая мощность турбины, МВт; $Q_{\text{отп}}$ — отпуск теплоты из отборов турбины, МВт; $Q_{\text{тур}}$ — расход теплоты на турбину в данном режиме, МВт.

При заданном общем отпуске теплоты $Q_{\text{отп}} = 550$ МВт и $\alpha_{\text{ТЭЦ}} = 0,65$ находим отпуск теплоты из отборов каждой турбины Т-105-130, предполагая, что тепловая нагрузка распределена между ними равномерно:

$$Q_{\text{отп}} = \frac{\alpha_{\text{ТЭЦ}} Q_{\text{отп}}}{2} = \frac{0,65 \cdot 550}{2} = 178,75 \text{ МВт.}$$

Теплофикационная мощность турбины

$$\begin{aligned} N_r &= 0,545(Q_r - 15,1)(10,2p_r)^{-0,14} = 0,545(178,75 - 15,1)(10,2 \cdot 0,098)^{-0,14} = \\ &= 0,545 \cdot 163,65 \cdot 1,03 = 91,86 \text{ МВт.} \end{aligned}$$

Расход теплоты на турбину при Q_r и N_r в данном режиме работы

$$\begin{aligned} Q_{\text{тур}} &= 107,1p_r + 2,33N - 1,315N_r + Q_r = 107 \cdot 0,098 + 2,33 \cdot 105 - 1,315 \times \\ &\times 91,86 + 178,75 = 10,5 + 244,65 - 120,79 + 178,75 = 313,1 \text{ МВт.} \end{aligned}$$

Таблица 5.1. Энергетические характеристики турбин (аналитические уравнения)

Тип турбины	Начальные параметры пара		Уравнения энергетических характеристик турбин	
	p_0 , МПа	t_0 , °C	Мощность на базе теплового потребления, МВт	Расход теплоты на турбину $Q_{\text{тур}}$, МВт
ПТ-60/75-130/13	12,75	565	$N_{\text{т}} = 0,528 \left(\frac{0,118}{p_{\text{т}}} \right)^{0,14} Q_{\text{т}} +$ $+ 0,305 \left(\frac{1,275}{p_{\text{т}}} \right)^{0,34} Q_{\text{нп}} -$ $- \left(9,9 - \frac{Q_{\text{т}}}{20,9} \right)$	$Q_{\text{тур}} = 16,3 + 2,33N -$ $- 1,315N_{\text{т}} + Q_{\text{отн}}$
ПТ-80/100-130/13	12,75	555	$N_{\text{т}} = 0,54Q_{\text{т}}(10,2p_{\text{т}})^{-0,14} +$ $+ 0,3 \left(\frac{1,275}{p_{\text{нп}}} \right)^{0,34} Q_{\text{нп}} -$ $- \left(11,6 - \frac{Q_{\text{т}}}{46,1} \right)$	$Q_{\text{тур}} = 16,3 + 1,98N -$ $- 0,97N_{\text{т}} + Q_{\text{отн}}$
ПТ-135/165-130/15	12,75	565	$N_{\text{т}} = 0,54 \left(\frac{0,118}{p_{\text{т}}} \right)^{0,14} Q_{\text{т}} +$ $+ 0,283 \left(\frac{1,47}{p_{\text{нп}}} \right)^{0,34} Q_{\text{нп}} -$ $- \left(21,9 - \frac{Q_{\text{т}}}{18,1} \right)$	$Q_{\text{тур}} = 20,95 + 1,995N -$ $- 0,94N_{\text{т}} + Q_{\text{отн}}$
Т-105/120-130	12,75	565	$N_{\text{т}} = 0,545(Q_{\text{т}} - 15,1)(10,2p_{\text{т}})^{-0,14}$ При работе со встроенным пучком $N_{\text{т}} = 0,6(Q'_{\text{т}} - 34,9)(10,2p_{\text{т}})^{-0,14};$ $Q'_{\text{т}} = Q_{\text{т}} + Q_{\text{н}}$	$Q_{\text{тур}} = 107,1p_{\text{т}} + 2,33N -$ $- 1,315N_{\text{т}} + Q_{\text{т}}$
Т-175/210-130	12,75	555	$N_{\text{т}} = 0,6(Q_{\text{т}} - 24,4)(10,2p_{\text{т}})^{-0,14}$	$Q_{\text{тур}} = 198,9p_{\text{т}} + 2,316N -$ $- 1,3N_{\text{т}} + Q_{\text{т}}$
Т-250/300-240	23,5	560/565	$N_{\text{т}} = 0,708(Q_{\text{т}} - 40,74) \times$ $\times (10,2p_{\text{т}})^{-0,07} - N_{\text{т.н}} + 0,618 -$ $- 0,708(10,2p_{\text{т}})^{-0,07} Q_{\text{с.н}}; N_{\text{т.н}} =$ $= 0,023Q_{\text{тур}} - 4,7$	$Q_{\text{тур}} = 296p_{\text{т}} + 1,98 +$ $+ 1,05Q_{\text{т}} - 0,65(Q_{\text{т}} -$ $- 26,48)(10,2p_{\text{т}})^{-0,07} -$ $- 9,3 + Q_{\text{с.н}}0,65 \times$ $\times (10,2p_{\text{т}})^{-0,07} + 0,48$
Р-50-130/13	12,75	565	$N_{\text{т}} = 0,3(Q_{\text{нп}} - 48,3) \left(\frac{1,275}{p_{\text{нп}}} \right)^{0,55}$	$Q_{\text{тур}} = 1,164 + 1,01N_{\text{т}} + Q_{\text{нп}}$
Р-100-130/15	12,75	565	$N_{\text{т}} = 0,31(Q_{\text{нп}} - 98,9) \left(\frac{1,47}{p_{\text{нп}}} \right)^{0,5}$	$Q_{\text{тур}} = 6,4 + 1,01N_{\text{т}} + Q_{\text{нп}}$

Расход топлива в котле в этом режиме

$$B = \frac{Q_{\text{тур}}}{Q_{\text{н}}^{\text{р}} \eta_{\text{т.н}} \eta_{\text{к.у}}},$$

где $Q_{\text{н}}^{\text{р}}$ — теплота сгорания топлива, ГДж/кг; для условного топлива $Q_{\text{н}}^{\text{р}} = 29,33$ ГДж/кг; $\eta_{\text{т.н}} = 0,98$ — КПД теплового потока, учитывающий

потери теплоты в главных паропроводах от котла до турбины; $\eta_{к.у}=0,92$ —КПД котельной установки (при работе на газе);

$$B = \frac{Q_{тур}}{Q_n \eta_{т.п} \eta_{к.у}} = \frac{313,1}{29,33 \cdot 0,98 \cdot 0,92} = 11,84 \text{ кг/с} = 42,62 \text{ т/ч.}$$

Доля расхода топлива на выработку и отпуск теплоты

$$B_t = \frac{Q_{отп}}{Q_n \eta_{тф} \eta_{к.у}} = \frac{178,75}{29,33 \cdot 0,98 \cdot 0,92} = 6,76 \text{ кг/с} = 24,33 \text{ т/ч,}$$

где $\eta_{тф}$ —КПД теплофикационной установки, учитывающий потери теплоты при выработке и отпуске.

Доля топлива, пошедшая на выработку электроэнергии на ТЭЦ,

$$B_z = B - B_t = 42,62 - 24,33 = 18,29 \text{ т/ч.}$$

Определяют удельные расходы топлива на электроэнергию и теплоту и частные КПД ТЭЦ по выработке электроэнергии и теплоты. Для этого определяют выработку электроэнергии и отпуск теплоты за $\tau_p = 1$ ч:

$$\mathcal{E}_{выр} = N_n \tau_p = 105 \cdot 10^3 \cdot 1 = 105 \cdot 10^3 \text{ кВт} \cdot \text{ч};$$

$$N_{отп}^t = Q_{отп} \tau_p = 178,75 \cdot 3600 = 643,5 \text{ ГДж/ч};$$

$$h_z = \frac{B_z}{\mathcal{E}_{выр}} = \frac{18,29 \cdot 10^3}{105 \cdot 10^3} = 0,174 \text{ кг/(кВт} \cdot \text{ч)};$$

$$b_t = \frac{B_t}{N_{отп}^t} = \frac{24,33 \cdot 10^3}{64,35} = 37,8 \text{ кг/ГДж};$$

$$\eta_{тэц}^t = \frac{\mathcal{E}_{выр} \cdot 3600}{Q_n^p B_z} = \frac{105 \cdot 10^3 \cdot 3600}{29,33 \cdot 18,29 \cdot 10^3} = 0,704;$$

$$\eta_{тэц}^{\tau} = \frac{N_{отп}^t}{Q_n^p B_t} = \frac{643,5}{29,33 \cdot 24,33} = 0,902 \approx \eta_{к.у}^{\tau}.$$

Для сопоставления ниже приводится решение той же задачи с помощью диаграммы режимов турбины Т-105-130. Находим по диаграмме режимов для турбины Т-100/120-130-3 (рис. 5.1) расход пара в заданном режиме $N_n = 105$ МВт; $Q_t = 178,75$ МВт; $p_t = 0,098$ МПа; $D_{тур} = 442$ т/ч; $h_{п.в} = 955$ кДж/кг; при $p_0 = 12,7$ МПа и $t_0 = 565^\circ \text{C}$, $h_0 = 3515$ кДж/кг.

Расход теплоты на турбину

$$Q'_{тур} = D_{тур} (h_0 - h_{п.в}) = \frac{442 \cdot 10^3}{3600} (3515 - 955) = 314,92 \text{ МВт.}$$

Таким образом, использование метода аналитической характеристики турбины дало отклонение от значения $Q_{тур}$, определенного по диаграмме режимов,

$$\frac{\Delta Q_{тур}}{Q'_{тур}} = \frac{Q'_{тур} - Q_{тур}}{Q'_{тур} \cdot 100} = \frac{314,92 - 313,1}{314,92 \cdot 100} = 0,58\%.$$

Такое расхождение для инженерных расчетов следует признать очень хорошим.

Задача 5.18. Определить полный и удельные расходы топлива и частные КПД ТЭЦ по выработке теплоты и электроэнергии с двумя турбинами Т-175-13 при следующих условиях работы: мощность ТЭЦ $N_3 = 350$ МВт; расчетный отпуск теплоты $Q_p = 755$ МВт; начальные параметры пара перед турбиной $p_0 = 12,7$ МПа, $t_0 = 555^\circ \text{C}$; коэффициент теплофикации $\alpha_{\text{тэц}} = 0,62$; среднее давление в теплофикационных отборах в расчетном режиме $p_r = 0,098$ МПа.

Ответ: $B = 66,46$ т/ч; $b_3 = 0,224$ кг/(кВт·ч); $b_r = 37,8$ кг/ГДж; $\eta_{\text{тэц}} = 0,549$; $\eta_{\text{тэц}}^{\text{п}} = 0,902$.

Задача 5.19. Определить полный и удельные расходы топлива и частные КПД ТЭЦ по выработке электроэнергии и теплоты с двумя турбинами Т-250-240 в следующем режиме: мощность ТЭЦ $N_3 = 520$ МВт, отпуск теплоты из отборов каждой турбины $Q_r = 1000$ ГДж/ч $= 277,7$ МВт. Среднее давление в отопительных отборах турбин в расчетном режиме $p_r = 0,098$ МПа. Начальные параметры, температура промежуточного перегрева и температура охлаждающей воды — расчетные: $p_0 = 23,5$ МПа; $t_0 = 560^\circ \text{C}$; $t_{\text{п.п}} = 565^\circ \text{C}$. Расход теплоты на собственные нужды $Q_{\text{с.н}} = 25$ МВт.

Решение. Мощность турбины на базе теплофикационных отборов $N_r = 0,708(Q_r - 40,74)(10,2p_r)^{-0,07} - N_{\text{т.п}} + 0,618 - 0,708(10,2p_r)^{-0,07}Q_{\text{с.н}}$.

Мощность приводной турбины питательного турбонасоса рекомендуется находить по формуле [17] $N_{\text{т.п}} = 0,023Q_{\text{тур}} - 4,7$. Однако предварительно необходимо оценить $N_{\text{т.п}}$, так как значение $Q_{\text{тур}}$ неизвестно. Значение $N_{\text{т.п}}$ можно оценить по обычной формуле для мощности, если задаться $V_{\text{п.п}} \cong D_r = 1000$ м³/ч $= 0,2777$ м³/с и $p_{\text{п.п}} = 32$ МПа, а $\eta_{\text{п.п}} = 0,70$:

$$N_{\text{т.п}} = \frac{V_{\text{п.п}} \Delta p_{\text{п.п}}}{\eta_{\text{п.п}}} = \frac{0,2777 \cdot 32 \cdot 10^6}{0,70} = 12\,690 \text{ кВт} = 12,69 \text{ МВт};$$

$$N_r = 0,708(277,7 - 40,74)(10,2 \cdot 0,098)^{-0,07} - 12,69 + 0,618 - 0,708(10,2 \cdot 0,098)^{-0,07} \cdot 25 = 152,75 \text{ МВт}.$$

Расход теплоты на турбину при работе по электрическому графику нагрузки

$$N_3 = \frac{N_{\text{тэц}}}{2} = \frac{520}{2} = 260 \text{ МВт};$$

$$Q_{\text{тур}} = 296p_r + 1,98N_3 + 1,05Q_r - 0,65(Q_r - 26,48)(10,2p_r)^{-0,07} - 9,3 + Q_{\text{с.н}}0,65(10,2p_r)^{-0,07} + 0,48 = 296 \cdot 0,098 + 1,98 \cdot 152,75 + 1,05 \cdot 277,7 - 0,65(277,7 - 26,48)(10,2 \cdot 0,098)^{-0,07} - 9,3 + 25[0,65(10,2 \cdot 0,098)^{-0,07}] + 0,48 = 601 \text{ МВт}.$$

Расход топлива на ТЭЦ

$$B = \frac{Q_{\text{тур}}}{Q_{\text{п}}^{\text{р}} \eta_{\text{т.п}} \eta_{\text{к.у}}} = \frac{601 \cdot 3,6}{29,33 \cdot 0,98 \cdot 0,92} = 81,82 \text{ т/ч}.$$

Расход топлива на отпуск теплоты

$$B_{\tau} = \frac{Q_{\text{тур}}}{Q_{\text{н}}^p \eta_{\text{т.п}} \eta_{\text{к.у}}} = \frac{277,7 \cdot 3,6}{29,33 \cdot 0,98 \cdot 0,92} = 37,8 \text{ т/ч.}$$

Расход топлива на выработку электроэнергии

$$B_3 = B - B_{\tau} = 81,82 - 37,8 = 44,02 \text{ т/ч.}$$

Удельные расходы топлива и частные КПД ТЭЦ по выработке электроэнергии и теплоты:

$$b_3 = \frac{44,02 \cdot 10^3}{260 \cdot 10^3} = 0,169 \text{ кг/(кВт} \cdot \text{ч)};$$

$$b_{\tau} = \frac{37,8 \cdot 10^3}{1000} = 37,8 \text{ кг/ГДж};$$

$$\eta_{\text{тэц}}^2 = \frac{0,123}{b_3} = 0,727; \quad \eta_{\text{тэц}}^1 = \frac{34,1}{37,8} = 0,902.$$

Задача 5.20. Определить расход теплоты и топлива на ТЭЦ с двумя турбинами ПТ-135/165-130/13 при следующих условиях работы: электрическая мощность ТЭЦ $N_{\text{ТЭЦ}} = 270$ МВт. Отпуск теплоты из промышленных отборов $Q_{\text{пр}} = 300$ МВт. Отпуск теплоты из теплофикационных отборов $Q_{\tau} = 120$ МВт. Начальные параметры у турбин — расчетные: $p_0 = 12,75$ МПа; $t_0 = 565^{\circ}\text{C}$. Давление в промышленном отборе $p_{\text{пр}} = 1,2$ МПа. Среднее давление в отопительных отборах $p_{\tau} = 0,098$ МПа.

Решение. По табл. 5.1 находим уравнение для теплофикационной мощности турбины ПТ-135-130

$$\begin{aligned} N_{\tau} &= 0,54 \left(\frac{0,118}{p_{\tau}} \right)^{0,14} Q_{\tau} + 0,283 \left(\frac{1,47}{p_{\text{пр}}} \right)^{0,34} Q_{\text{пр}} - \left(21,9 - \frac{Q_{\tau}}{18,1} \right) = \\ &= 0,54 \left(\frac{0,118}{0,098} \right)^{0,14} \cdot 60 + 0,283 \left(\frac{1,47}{1,2} \right)^{0,34} \cdot 150 - \left(21,9 - \frac{60}{18,1} \right) = 60,14 \text{ МВт.} \end{aligned}$$

Расход теплоты в заданном режиме по формуле

$$\begin{aligned} Q_{\text{тур}} &= 20,95 + 1,955N - 0,94N_{\tau} + Q_{\text{отп}} = 20,95 + 1,955 \cdot 135 - 0,94 \cdot 60,13 + \\ &+ 150 + 60 = 551,37 \text{ МВт.} \end{aligned}$$

Расход топлива на ТЭЦ с учетом работы двух турбин в том же режиме

$$B = \frac{2Q_{\text{тур}}}{Q_{\text{н}}^p \eta_{\text{т.п}} \eta_{\text{к.у}}} = \frac{2 \cdot 551,37 \cdot 3,6}{29,33 \cdot 0,98 \cdot 0,92} = 150,12 \text{ т/ч.}$$

Задача 5.21. Определить расходы условного топлива на ТЭЦ с двумя турбинами ПТ-80/100-130/13 при следующих условиях работы: электрическая мощность ТЭЦ $N_{\text{ТЭЦ}} = 175$ МВт. Отпуск теплоты из промышленных отборов $Q_{\text{пр}} = 160$ МВт. Отпуск теплоты из отопительных отборов $Q_{\tau} = 80$ МВт. Начальные параметры пара у турбин — расчетные: $p_0 = 12,75$ МПа, $t_0 = 555^{\circ}\text{C}$. Давление в промышленном отборе $p_{\text{пр}} = 1,4$ МПа. Среднее давление в отопительных отборах $p_{\tau} = 0,098$ МПа.

Ответ: $B \approx 97,5$ т/ч.

Задача 5.22. Определить необходимый запас топлива на ТЭЦ для работы ее в течение недели в следующем режиме: на ТЭЦ установлены две турбины ПТ-135-130. Мощность ТЭЦ в среднем за сутки $N=250$ МВт. Отпуск теплоты из промышленного отбора $Q_{\text{пр}}=250$ МВт. Отпуск теплоты из теплофикационных отборов $Q_{\text{т}}=140$ МВт. Начальные параметры у турбин—расчетные: $p_0=12,75$ МПа, $t_0=565^\circ\text{C}$. Давление в промышленном отборе $p_{\text{пр}}=1,1$ МПа. Среднее давление в теплофикационных отборах $p_{\text{т}}=0,098$ МПа.

Ответ: 18 150 т.

Задача 5.23. Определить полные, удельные расходы топлива, а также частные КПД ТЭЦ по выработке электроэнергии и теплоты с двумя турбинами Р-50-130 при следующем режиме работы: начальные параметры у турбин—расчетные: $p_0=12,75$ МПа; $t_0=565^\circ\text{C}$. Отпуск теплоты из противодавления турбин от двух турбин $Q_{\text{пр}}$ составляет 360 МВт. Давление за турбинами $p_{\text{пр}}=1,4$ МПа.

Решение. Определяют теплофикационную мощность турбины в заданном режиме по формуле, приведенной в табл. 5.1:

$$N_{\text{т}}=0,3(Q_{\text{пр}}-48,3)\left(\frac{1,275}{p_{\text{пр}}}\right)^{0,55}=0,3(180-48,3)\left(\frac{1,275}{1,4}\right)^{0,55}=37,5 \text{ МВт.}$$

Расход теплоты на турбину в заданном режиме

$$Q_{\text{тур}}=1,164+1,01N_{\text{т}}+0,5Q_{\text{пр}}=1,164+1,01\cdot 37,5+180=219 \text{ МВт.}$$

Общий расход топлива на ТЭЦ

$$B=\frac{2Q_{\text{тур}}^{3,6}}{Q_{\text{н}}^p\eta_{\text{т.п}}\eta_{\text{к.у}}}=\frac{2\cdot 219\cdot 3,6}{29,33\cdot 0,98\cdot 0,92}=59,6 \text{ т/ч.}$$

Расход топлива, связанный с отпуском теплоты промышленным потребителям,

$$B_{\text{т}}=\frac{Q_{\text{пр}}}{Q_{\text{н}}^p\eta_{\text{тф}}\eta_{\text{к.у}}}=\frac{360\cdot 3,6}{29,33\cdot 0,98\cdot 0,92}=49,0 \text{ т/ч.}$$

Расход топлива, отнесенный на выработку электроэнергии,

$$B_{\text{э}}=B-B_{\text{т}}=59,6-49,0=10,6 \text{ т/ч.}$$

Удельные расходы топлива и частные КПД ТЭЦ:

$$b_{\text{э}}=\frac{B_{\text{э}}}{2N_{\text{т}}}=\frac{10,9\cdot 10^3}{2\cdot 37,5\cdot 1}=0,145 \text{ кг/(кВт}\cdot\text{ч);}$$

$$b_{\text{т}}=\frac{B_{\text{т}}}{Q_{\text{пр}}}=\frac{49\cdot 10^3}{360\cdot 3,6}=48,9 \text{ кг/ГДж;}$$

$$\eta_{\text{тэц}}^{\text{т}}=\frac{0,123}{b_{\text{э}}}=0,848;$$

$$\eta_{\text{тэц}}^{\text{э}}=\frac{34,1}{b_{\text{т}}}=0,697.$$

ВЫБОР ОСНОВНОГО И ВСПОМОГАТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Задача 6.1. Определить состав основного оборудования источников теплоты для промышленного предприятия, потребляющего $Q_p = 80$ ГДж/ч теплоты в горячей воде на нужды отопления, горячего водоснабжения и вентиляции. Район расположен в 50 км от Ленинграда. Имеется связь с энергосистемой. Стоимость замыкающего топлива в районе $C_{з, \text{топ}} = 27$ руб/т.

Решение. Определяют возможную мощность ТЭЦ при заданной потребности в теплоте промышленного предприятия [10]

$$N_{\text{уст}} = 1,05 \bar{\alpha}_{\text{ТЭЦ}} Q_p = 1,05 \cdot 55 \cdot 0,6 \cdot 80 = 2770 \text{ кВт.}$$

Удельную комбинированную выработку $\bar{\alpha}$ следует оценить для предварительного расчета по данным [12] для средних начальных параметров $\bar{\alpha} = 55$ кВт·ч/ГДж. При цене условного топлива выше 25 руб/т $\alpha_{\text{ТЭЦ}}$ следует принимать 0,6. Полученная мощность ТЭЦ очень мала (2,77 МВт) [по ГОСТ 3618-82 минимальная мощность теплофикационных агрегатов ТЭЦ составляет 6 МВт (Т-6-35)], поэтому для теплоснабжения завода рекомендуется выбрать раздельную схему теплоснабжения с установкой водогрейных котлов. Может быть рекомендована, например, установка двух котлов КВГМ-20-150 или трех котлов КВГМ-10-150. Первый тип котлов имеет номинальную производительность $Q_n = 23,3$ МВт, а второй 11,6 МВт [15]. Расчетная потребность в теплоте промышленного предприятия $Q_{\text{пр}} = 80$ ГДж/ч = 22,2 МВт. Наиболее целесообразно выбрать второй вариант с установкой трех котлов типа КВГМ-10-150, причем один из котлов будет резервным на случай ремонта или аварии с одним из трех котлов. Для определения оптимального типа котлов и состава котельной в условиях рабочего проектирования для конкретного промышленного предприятия рекомендуется провести технико-экономическое сравнение вариантов по приведенной стоимости с учетом надежности теплоснабжения промышленного потребителя.

Задача 6.2. Определить состав оборудования для теплоснабжения промышленного предприятия с расходом пара на технологию давлением $p_{\text{пр}} = 0,8$ МПа $D_{\text{пр}} = 12$ т/ч, а также на отопление, промышленную вентиляцию и горячее водоснабжение $Q_{\text{от}} = 120$ ГДж/ч = 33,3 МВт. Топливо на площадке промышленного предприятия — газ; $C_{\text{топ}} = 35$ руб/1000 м³ (при $T = 273$ К и $p_{\text{от}} = 0,102$ МПа).

Решение. Определяют мощность ТЭЦ при заданном теплоснабжении промышленного предприятия [10]:

$$N_{\text{уст}} = \psi_k (\bar{\alpha}_{\text{от}} \alpha_{\text{ТЭЦ}} Q_{\text{от}} + \bar{\alpha}_{\text{пр}} \alpha_{\text{пр}} Q_{\text{пр}}),$$

где $\psi_k = 1,05$ — коэффициент минимальной конденсационной выработки на теплофикационных турбинах; $\bar{\alpha}_{\text{от}}$ и $\bar{\alpha}_{\text{пр}}$ — удельная комбинированная выработка на базе отпуска теплоты соответственно из отопительного

и промышленного отборов; $\alpha_{\text{ТЭЦ}}$ и $\alpha_{\text{пр}}$ — коэффициенты теплофикации онной и промышленной нагрузки; $\bar{Q}_{\text{от}}$ и $\bar{Q}_{\text{пр}}$ — расчетные значения теплофикационной и промышленно-технологической нагрузки.

Находят $\bar{\varepsilon}_{\text{от}}$ и $\bar{\varepsilon}_{\text{пр}}$ для отопительного и промышленного отбора, принимая, что $p_{\text{от}} = 0,15$ МПа. Начальные параметры на промышленной ТЭЦ предварительно принимают равными $p_0 = 3,4$ МПа, $t_0 = 435^\circ \text{C}$. Давление в конденсаторе принимают $p_{\text{к}} = 5$ КПа; $t_{\text{к}} = 32^\circ \text{C}$. Возврат конденсата от промышленного потребителя отсутствует, а восполнение потерь рабочей теплоты производится химически очищенной водой с температурой $t_{\text{х.о.в}} = 32^\circ \text{C}$. Температуру питательной воды на ТЭЦ принимают для этих начальных параметров $t_{\text{п.в}} = 150^\circ \text{C}$. Определяют $\omega_{\text{от}}$ и $\omega_{\text{пр}}$, а также ω_0 :

$$\omega_{\text{от}} = 1 - \frac{T_{\text{к}}}{T_{\text{от}}} = 1 - \frac{32 + 273}{110 + 273} = 1 - \frac{305}{383} = 0,204;$$

$$\omega_{\text{пр}} = 1 - \frac{T_{\text{к}}}{T_{\text{пр}}} = 1 - \frac{305}{170,4 + 273} = 1 - \frac{305}{443,4} = 0,31;$$

$$\omega_0 = 1 - \frac{T_{\text{к}}}{T_0^{\text{ср}}} = 1 - \frac{305}{519,8} = 1 - 0,587 = 0,413;$$

$$T_0^{\text{ср}} = \frac{h_0 - h_{\text{п.в}}}{s_0 - s_{\text{п.в}}} = \frac{3304,9 - 634,6}{6,974 - 1,837} = 519,8 \text{ К}.$$

Находят значения $\bar{\varepsilon}_{\text{от}}$ и $\bar{\varepsilon}_{\text{пр}}$ по формулам [14]

$$\bar{\varepsilon}_{\text{от}} = 278 \eta_{\text{эм}} \left(\frac{1 - \omega_{\text{от}}}{(\omega_0 - \omega_{\text{от}}) \eta_{\text{от}}} - 1 \right)^{-1} = 278 \cdot 0,97 \left(\frac{1 - 0,204}{(0,413 - 0,204) 0,82} - 1 \right)^{-1} =$$

$$= 74 \text{ кВт} \cdot \text{ч/КДж};$$

$$\bar{\varepsilon}_{\text{пр}} = 278 \eta_{\text{эм}} \left(\frac{1 - \omega_{\text{пр}}}{(\omega_0 - \omega_{\text{пр}}) \eta_{\text{от}}} - 1 \right)^{-1} = 278 \cdot 0,97 \times$$

$$\times \left(\frac{1 - 0,31}{(0,413 - 0,31) 0,82} - 1 \right)^{-1} = 37,6 \text{ кВт} \cdot \text{ч/ГДж}.$$

Количество теплоты, отпускаемой из промышленного отбора с паром,

$$Q_{\text{пр}} = D_{\text{пр}} (h_{\text{пр}} - h'_{\text{в.к}}) = 12 \cdot 10^3 \cdot (2956 - 134) = 33,86 \text{ ГДж/ч}.$$

Энтальпию промышленного отбора $h_{\text{пр}}$ находят по процессу расширения пара на h , s -диаграмме при заданном $\eta_{\text{от}} = 0,82$; $h_{\text{пр}} = 2956 \text{ КДж/кг}$.

По таблицам свойств воды и водяного пара находят $h'_{\text{в.к}} = h'_{\text{х.о.в}} = 134 \text{ КДж/кг}$.

Для рассматриваемого района с дорогим топливом ($C_{\text{топ}} = 35$ руб/т условного топлива) можно предварительно принять $\alpha_{\text{ТЭЦ}} = 0,62$ и $\alpha_{\text{пр}} = 0,85$.

Минимальная мощность для покрытия тепловых нагрузок

$$N_{\text{уст}}^{\text{мин}} = 1,05 (74 \cdot 0,62 \cdot 120 + 37,6 \cdot 0,85 \cdot 33,86) = 6917 \text{ кВт}.$$

Для удовлетворения потребности в паре технологического потребителя можно рекомендовать к установке турбину П-1,5-35 с номинальным регулируемым промышленным отбором $D_{\text{пр}}^{\text{н}} = 12$ т/ч. Для покрытия отопительной, вентиляционной и нагрузки горячего водоснабжения при $\alpha_{\text{ТЭЦ}} = 0,62$ необходимо отпускать из отборов турбины $Q_{\text{отб}}$

$$Q_{\text{отб}} = \alpha_{\text{ТЭЦ}} Q_{\text{от}} = 0,62 \cdot 120 = 74,4 \text{ ГДж/ч.}$$

В этом случае подходит турбина типа Т-6-35 с номинальным расходом в отопительный отбор $D_{\text{от}} = 35$ т/ч, что соответствует отпуску теплоты из отбора $Q_{\text{отб}} = 76$ ГДж/ч. Расход свежего пара на турбину Т-6-35 при номинальном отопительном отборе $D_{\text{т}} = 47,6$ т/ч. Расход свежего пара на турбину П-1,5-35 $D_{\text{т}} = 17,5$ т/ч. Суммарный расход свежего пара с учетом расхода на собственные нужды 10%

$$D_{\text{с}} = (47,6 + 17,5) \cdot 1,1 = 71,6 \text{ т/ч.}$$

Для выработки свежего пара в количестве $D_{\text{с}} = 71,6$ т/ч наиболее подходят котлы Белгородского завода энергетического машиностроения типа Е-35-40 (К-35-40) производительностью $D_{\text{к.у}} = 35$ т/ч при параметрах свежего пара $p_{\text{к.у}} = 4$ МПа, $t_{\text{к.у}} = 440^\circ \text{С}$ и температуре питательной воды $t_{\text{п.в}} = 145^\circ \text{С}$. Необходима установка двух таких котлов, работающих на газе или на каменных и бурых углях в зависимости от моделей котла. В качестве варианта раздельной схемы теплоснабжения завода можно предложить установку двух котлов Е-6,5-14 для покрытия паровой технологической нагрузки и одного водогрейного котла КВГМ-30-150 на газе и мазуте или одного котла КВТС-30-150 на твердом топливе. В этом раздельном варианте теплоснабжения вся необходимая электрическая мощность будет получаться в энергосистеме и передаваться на предприятие по линиям электропередачи.

В случае необходимости более подробной проработки технико-экономического обоснования сравнения вариантов теплотенергоснабжения следует провести подробный расчет приведенных затрат по каждому из вариантов и сравнить их между собой. Считается, что варианты равнозначны, если приведенные затраты отличаются не более чем на 5%.

Задача 6.3. Выбрать систему теплотенергоснабжения промышленного района, потребляющего на технологию $D_{\text{пр}} = 1200$ т/ч пара с давлением $p_{\text{пр}} = 1,2$ МПа; возврат конденсата $D_{\text{в.к}}$ составляет 800 т/ч с температурой $t_{\text{в.к}} = 85^\circ \text{С}$; на горячее водоснабжение, отопление и промышленную вентиляцию $Q = 1500$ ГДж/ч. Район расположен вблизи Караганды. Топливо — каменный уголь; $C_{\text{з.топ}} = 17$ руб/т условного топлива.

Решение. Район имеет большую технологическую нагрузку, поэтому следует выбрать комбинированную систему теплотенергоснабжения от ТЭЦ на органическом топливе [15]. При раздельной схеме только для выработки пара для технологических потребителей потребовалась бы установка не менее 24 котлов типа Е-50-14, что нецелесообразно ни по капитальным, ни по приведенным затратам, ни по расходам топлива. Для комбинированной схемы с ТЭЦ следует рассмотреть два варианта покрытия технологической нагрузки: с установкой 1) турбин с противодавлением, 2) турбины с промышленным и отопительным отбором типа ПТ-80-130 или ПТ-135-130. При непрерывной

работе технологических установок в течение суток и в течение года предпочтительнее установка более простых и дешевых противоаварийных турбин. Среднее время использования максимальной технологической нагрузки должно составлять не менее 4000—5000 ч, чтобы обеспечить достаточную нагрузку турбин с противоаварийным. Электрическая мощность турбин типа Р с противоаварийным целиком определяется пропуском пара через турбину, идущим далее к технологическим потребителям (из-за отсутствия конденсатора у этого типа турбин). Пар конденсируется в аппаратах и установках технологических потребителей, обратно на ТЭЦ возвращается конденсат от конденсаторных узлов промышленных предприятий. Для подачи на технологию $D_{\text{пр}} = 1200$ т/ч при $p_{\text{пр}} = 1,2$ МПа можно выбрать турбину Р-100-130/15 и Р-50-130/13, которые обеспечат подачу пара на технологию в количестве $D_{\text{пр}} = 1000$ т/ч. В этом случае обеспечивается коэффициент промышленной нагрузки

$$\alpha_{\text{пр}} = \frac{D_{\text{пр}}}{D_{\text{пр(расч)}}} = \frac{1000}{1200} = 0,833.$$

В случае выбора турбин ПТ-135-130 для покрытия технологической нагрузки (номинальный промышленный отбор такой турбины равен $D_{\text{пр}}^{\text{н}} = 320$ т/ч) их потребовалось бы четыре:

$$z = D_{\text{пр}} / D_{\text{пр}}^{\text{н}} = 1200 / 320 \approx 4.$$

Определим тип и количество турбин для покрытия тепловой нагрузки в горячей воде. Можно выбрать наиболее мощные теплофикационные турбины Т-100-130 или Т-175-130. Для этих турбин начальные параметры пара $p_0 = 12,7$ МПа; $t_0 = 555^\circ \text{C}$. По h , s -диаграмме водяного пара $h_0 = 3484$ КДж/кг; $s_0 = 6,62$ КДж/(кг · К). Для таких параметров пара температура питательной воды $t_{\text{п.в}} = 230^\circ \text{C}$; $h_{\text{п.в}} = 948,6$ КДж/кг ($p_{\text{п.в}} = 18$ МПа); $s_{\text{п.в}} = 2,49$ КДж/(кг · К). Находим значения ω_0 ; ω_0 ; $\bar{\omega}_{\text{от}}$ отопительного отбора:

$$t_{\text{от}}^{\text{н}} = 125^\circ \text{C} \quad (p_{\text{от}} = 0,245 \text{ МПа}); \quad p_{\text{к}} = 5 \text{ КПа}; \quad t_{\text{к}} = 32^\circ \text{C};$$

$$\omega_{\text{от}} = 1 - \frac{T_{\text{к}}}{T_{\text{от}}} = 1 - \frac{32 + 273}{125 + 273} = 1 - \frac{305}{398} = 0,234;$$

$$T_0^{\text{сп}} = \frac{h_0 - h_{\text{п.в}}}{s_0 - s_{\text{п.в}}} = \frac{3484 - 948,6}{6,62 - 2,49} = 613,9 \text{ К};$$

$$\omega_0 = 1 - \frac{T_{\text{к}}}{T_0^{\text{сп}}} = 1 - \frac{305}{613,9} = 0,503;$$

$$\bar{\omega}_{\text{от}} = 278 \eta_{\text{эм}} \left(\frac{1 - \omega_{\text{от}}}{(\omega_0 - \omega_{\text{от}}) \eta_{\text{oi}}} - 1 \right)^{-1} = 278 \cdot 0,97 \left(\frac{1 - 0,234}{(0,503 - 0,234) \cdot 0,82} - 1 \right)^{-1} = 108,7 \text{ кВт} \cdot \text{ч/ГДж}.$$

Находим суммарную мощность теплофикационных турбин при заданном расчетном отпуске теплоты $Q_{\text{р}} = 1500$ ГДж/ч, задаваясь значением коэффициента теплофикации $\alpha_{\text{ТЭЦ}} = 0,625$:

$$N_{\text{т}} = \psi_{\text{к}} \bar{\omega}_{\text{от}} \alpha_{\text{ТЭЦ}} Q_{\text{р}} = 1,05 \cdot 108,7 \cdot 0,625 \cdot 1500 = 107 \, 001 \text{ кВт}.$$

Это значение мощности на базе отпуска теплоты с горячей водой соответствует установке одной турбины типа Т-100-130. Отпуск теплоты из отборов турбины в расчетном режиме $Q_{отб} = \alpha_{тэц} Q_p = 0,625 \cdot 1500 = 937,5$ ГДж/ч.

По данным завода-изготовителя (УТМЗ) турбина Т-100-130 может отпустить из двух теплофикационных отборов и от встроенного пучка в конденсаторе $Q_{отб} = 760$ ГДж/ч. В этом случае фактическое значение $\alpha_{тэц}$ по заданной теплофикационной нагрузке составит

$$\alpha_{тэц}^{\Phi} = \frac{Q_{отб}^{\Phi}}{Q_p} = \frac{760}{1500} = 0,506.$$

При стоимости замыкающего топлива $C_{з.топ} = 17$ руб/т условного топлива значение $\alpha_{тэц} = 0,506$ близко к оптимальному значению. При установке турбины Т-175-130 отпуск из теплофикационных отборов $Q_{отб}$ составит 1170 ГДж/ч. В этом случае коэффициент теплофикации

$$\alpha_{тэц} = \frac{Q_{отб}}{Q_p} = \frac{1170}{1500} = 0,782.$$

Такое значение коэффициента теплофикации выше оптимального значения $\alpha_{тэц} = 0,52$. Кроме того, значение $\alpha_{тэц} = 0,782$ при температурном графике в сети $t'_1/t'_2 = 150/70$ и качественном регулировании не может быть реализовано, так как при максимальном давлении в отопительном отборе $p_{от} = 0,245$ МПа нагрев сетевой воды может составлять $t_n = 120^\circ$ С. В этом случае фактическое значение $\alpha_{тэц}$ с учетом возможного нагрева сетевой воды

$$\alpha_{тэц}^{\Phi} = \frac{t_n - t'_2}{t'_1 - t'_2} = \frac{120 - 70}{150 - 70} = 0,625.$$

Установка турбин меньшей мощности, чем Т-100-130, например $2 \times$ Т-50-130, явно нецелесообразна из-за увеличения удельных капитальных затрат.

Таким образом, по условиям задачи можно рекомендовать выбор варианта ТЭЦ с установкой турбин $1 \times$ Р-100-130 + $1 \times$ Р-50-130 + $1 \times$ Т-100-130. Можно рассмотреть и альтернативный вариант: $1 \times$ Р-100-130 + $1 \times$ ПТ-135-130 + $1 \times$ Т-100-130. Окончательный выбор варианта должен базироваться на подробном технико-экономическом расчете по приведенным затратам. В качестве основных котлов можно рекомендовать выбор четырех котлов типа Е-500-140 Барнаульского котельного завода (заводская маркировка БКЗ-500-140-1). Общая производительность $\sum D_{к.у}$ составляет в этом варианте 2000 т/ч, что удовлетворяет оба варианта набора турбин. В качестве пиковых водогрейных котлов можно рекомендовать два котла типа КВТК-100-150 общей производительностью примерно $Q_{пвк} = 840$ ГДж/ч. Суммарная производительность отпускаемой теплоты с учетом установки турбины Т-100-130 и двух пиковых водогрейных котлов составит

$$Q_{\Sigma} = Q_{тур}^{отб} + Q_{пвк} = 760 + 840 = 1600 \text{ ГДж/ч.}$$

Таким образом, Q_{Σ} больше расчетной потребности в теплоте $Q_p = 1500$ ГДж/ч на 100 ГДж/ч.

Задача 6.4. Выбрать тип энергоустановки для покрытия пиковой электрической нагрузки промышленного района $N_{пик} = 400$ МВт. Район

не связан с энергосистемой; в районе имеется дешевый попутный газ с $C_{\text{топ}} = 17$ руб/т условного топлива.

Решение. Если в районе нет гидростанций и нет природных условий для строительства гидроаккумулирующей электростанции (ГАЭС) для покрытия пиковой электрической нагрузки, то наиболее целесообразным типом энергоустановки будет газотурбинная энергоустановка (ГТУ). В соответствии с ГОСТ 2270-78 на газотурбинные энергетические установки наиболее подходят в качестве пиковой мощности две установки типа ГТЭ-200 общей мощностью $N_{\text{уст}} = 400$ МВт. КПД этих ГТУ равен $\eta_{\text{ГТУ}} = 0,32$ в номинальном режиме работы. В качестве альтернативного варианта могут быть предложены три ГТУ типа ГТЭ-150 с КПД $\eta_{\text{ГТУ}} = 0,31$. Первый вариант предпочтительнее как по капитальным затратам, так и по $\eta_{\text{ГТУ}}$, следовательно, можно рекомендовать в качестве пиковой электрической мощности установку двух агрегатов ГТЭ-200.

Задача 6.5. Выбрать основное оборудование для системы теплоснабжения машиностроительного завода. Потребности в горячей воде на отопление, вентиляцию и горячее водоснабжение составляют $Q_p = 3600$ ГДж/ч. Тепловая сеть закрытая, двухтрубная, регулирование качественное с температурным графиком тепловой сети $t'_1/t'_2 = 150/70^\circ \text{C}$. Район находится в энергосистеме со стоимостью замыкающего топлива $C_{\text{з.топ}} = 45$ руб/т условного топлива.

Решение. Находим фактическое значение коэффициента теплофикации

$$\alpha_{\text{ф.т.}} = \frac{t_{\text{оп}} - t'_2}{t'_1 - t'_2} = \frac{120 - 70}{150 - 70} = 0,625.$$

Электрическая мощность, которую необходимо иметь, чтобы отпустить из отборов теплофикационных турбин оптимальное количество теплоты,

$$N_T = \psi_{\text{к}} \bar{\varepsilon}_{\text{от}} \alpha_{\text{ф.т.}} Q_p.$$

Значение $\bar{\varepsilon}$ находим по методу, изложенному в задаче 6.3, ориентируясь при этом на турбины типа Т-110-130 или Т-175-130. Для таких турбин начальные параметры $p_0 = 12,7$ МПа; $t_0 = 555^\circ \text{C}$; $h_0 = 3484$ КДж/кг; $S_0 = 6,62$ КДж/(кг·К); $t_{\text{п.в}} = 230^\circ \text{C}$; $h_{\text{п.в}} = 948,6$ КДж/кг ($p_{\text{п.в}} = 18$ МПа); $S_{\text{п.в}} = 2,49$ КДж/(кг·К). Находим значения $\omega_{\text{от}}$; ω_0 ; $\bar{\varepsilon}_{\text{от}}$ для отопительного отбора $t_{\text{от}}^{\text{н}} = 125^\circ \text{C}$ ($p_{\text{от}} = 0,245$ МПа); $p_{\text{к}} = 5$ КПа; $t_{\text{к}} = 32^\circ \text{C}$:

$$\omega_{\text{от}} = 1 - \frac{T_{\text{к}}}{T_{\text{от}}} = 1 - \frac{32 + 273}{125 + 273} = 1 - \frac{305}{398} = 0,234;$$

$$T_0^{\text{ср}} = \frac{h_0 - h_{\text{п.в}}}{S_0 - S_{\text{п.в}}} = \frac{3484 - 948,6}{6,62 - 2,49} = 613,9 \text{ К};$$

$$\omega_0 = 1 - \frac{T_{\text{к}}}{T_0^{\text{ср}}} = 1 - \frac{305}{613,9} = 0,503;$$

$$\begin{aligned} \bar{\varepsilon}_{\text{от}} &= 278 \eta_{\text{эм}} \left(\frac{1 - \omega_{\text{от}}}{(\omega_0 - \omega_{\text{от}}) \eta_{\text{о.и}}} - 1 \right)^{-1} = 278 \cdot 0,97 \left(\frac{1 - 0,234}{(0,503 - 0,234) \cdot 0,82} - 1 \right)^{-1} = \\ &= 108,7 \text{ кВт} \cdot \text{ч/ГДж}. \end{aligned}$$

Подставляя значения $\alpha_{\text{ТЭЦ}}$, $\bar{\varepsilon}_{\text{от}}$, $\psi_{\text{к}}$, $Q_{\text{р}}$ в формулу для $N_{\text{т}}$, находим общую мощность турбин:

$$N_{\text{т}} = 1,05 \cdot 108,7 \cdot 0,625 \cdot 3600 = 256803,7 \text{ кВт.}$$

Установка разнотипных турбин с точки зрения ремонта и эксплуатации менее желательна. Поэтому можно выбрать вариант установки [15] трех турбин Т-110-130 или альтернативный вариант установки двух турбин Т-175-130. С точки зрения повышения надежности теплоснабжения следует рекомендовать вариант установки трех турбин Т-110-130, которые с учетом работы встроенных пучков в конденсаторе могут отпустить из отборов теплоты $Q_{\text{отб}} = 2260 \text{ ГДж/ч}$.

Необходимая производительность пиковых водогрейных котлов должна составить

$$Q_{\text{пвк}} = 3600 - 2260 = 1340 \text{ ГДж/ч.}$$

Можно рекомендовать к установке два котла КВГМ-180-150 с общей нагрузкой $Q_{\text{пвк}} = 1500 \text{ ГДж/ч}$. В случае отсутствия газомазутного топлива следует рекомендовать пиковые водогрейные котлы КВТК-100-150 на твердом топливе в количестве четырех штук. В этом случае $Q_{\text{пвк}} = 1676 \text{ ГДж/ч}$.

В качестве основных энергетических котлов следует рекомендовать к установке четыре котла Е-420-140Ж (заводская маркировка БКЗ-420-140-ПТ-2) Барнаульского котельного завода по ГОСТ 3619-82*. Общая производительность по пару энергетических котлов

$$D_{\text{к.у}} = 4 \times 420 = 1680 \text{ т/ч.}$$

Эта производительность обеспечивает работу турбины и в варианте $3 \times \text{Т-110-130}$ и в варианте $2 \times \text{Т-175-130}$.

Глава седьмая

ЗАЩИТА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ ОТ ВРЕДНЫХ ВЫДЕЛЕНИЙ ТЭС. ТЕХНИЧЕСКОЕ ВОДОСНАБЖЕНИЕ ТЭС. ПЫЛЕУЛАВЛИВАНИЕ

Задача 7.1. Рассчитать высоту дымовой трубы для ТЭЦ номинальной мощностью $N_{\text{э}} = 300 \text{ МВт}$, работающей на угле Богословского месторождения (Урал). ТЭЦ расположена в районе г. Троицка. Максимальная выработка теплоты на ТЭЦ $Q_{\text{ТЭЦ}}^{\text{макс}} = 2000 \text{ ГДж/ч}$. Частные КПД ТЭЦ по выработке электроэнергии и теплоты $\eta_{\text{э.э}}^{\text{бр}} = 0,38$; $\eta_{\text{т.э}}^{\text{бр}} = 0,79$. Средний коэффициент улавливания электрофильтров $\eta_{\text{эу}} = 98\%$. Местность в районе расположения ТЭЦ равнинная.

Решение. Расход условного топлива на ТЭЦ

$$B_{\text{ТЭЦ}}^{\text{у}} = B_{\text{ТЭЦ}}^{\text{э.э}} + B_{\text{ТЭЦ}}^{\text{т.э}} = \varepsilon_{\text{ТЭЦ}} b_{\text{ТЭЦ}}^{\text{э.э}} + Q_{\text{ТЭЦ}}^{\text{макс}} b_{\text{ТЭЦ}}^{\text{т.э}};$$

здесь $b_{\text{ТЭЦ}}^{\text{т.з.}} = \frac{0,123}{\eta_{\text{т.з.}}^{\text{б.р.}}} = 0,324 \text{ кг/((кВт} \cdot \text{ч))}$; $b_{\text{ТЭЦ}}^{\text{т.з.}} = \frac{34,1}{\eta_{\text{т.з.}}^{\text{б.р.}}} = 43,16 \text{ кг/ГДж}$; $B_{\text{ТЭЦ}}^{\text{т.з.}} = 300\,000 \cdot 0,324 + 2000 \cdot 43,16 = 97\,200 + 86\,320 = 183\,520 \text{ кг/ч} = 183,52 \text{ т/ч}$.

По справочным данным для угля Богословского месторождения теплота сгорания на рабочую массу топлива $Q_{\text{н}}^{\text{р}} = 11\,355 \text{ кДж/кг}$; зольность $A^{\text{р}} = 25\%$; содержание серы $(S_{\text{к}}^{\text{р}} + S_{\text{орг}}^{\text{р}}) = 0,3\%$; удельный объем продуктов сгорания без избытка воздуха $V_0^{\text{т}} = 3,72 \text{ м}^3/\text{кг}$, теоретический объем воздуха $V_0 = 3,13 \text{ м}^3/\text{кг}$ (при $T = 273 \text{ К}$, $p = 0,102 \text{ МПа}$).

Расход натурального топлива на ТЭЦ

$$B_{\text{ТЭЦ}}^{\text{р}} = B_{\text{ТЭЦ}}^{\text{т.з.}} \frac{Q_{\text{н}}^{\text{т.з.}}}{Q_{\text{н}}^{\text{р}}} = 183,52 \frac{29\,330}{11\,355} = 474,03 \text{ т/ч}.$$

Выход летучей золы

$$M_{\text{з}} = B_{\text{ТЭЦ}}^{\text{р}} A^{\text{р}} (1 - \eta_{\text{з.у}}) = 474,03 \cdot 0,25 (1 - 0,98) = 2,37 \text{ т/ч} = 658,37 \text{ г/с}.$$

Количество сжигаемой серы

$$M_{\text{S}} = B_{\text{ТЭЦ}}^{\text{р}} (S_{\text{к}}^{\text{р}} + S_{\text{орг}}^{\text{р}}) = 474,03 \cdot 0,003 = 1,42 \text{ т/ч}.$$

Выход диоксида серы

$$M_{\text{SO}_2} = M_{\text{S}} \frac{\mu_{\text{SO}_2}}{\mu_{\text{S}}} = 1,42 \frac{64}{32} = 2,84 \text{ т/ч} = 789 \text{ г/с},$$

где μ_{SO_2} и μ_{S} — молекулярные массы диоксида серы.

Безразмерный коэффициент F , учитывающий скорость оседания вредных веществ в атмосферном воздухе:

для диоксида серы $F_{\text{SO}_2} = 1$;

для летучей золы (при коэффициенте улавливания $\eta_{\text{з.у}} > 90\%$) $F_{\text{з}} = 2$.
 $\text{ПДК}_{\text{з}} = \text{ПДК}_{\text{SO}_2} = 0,5 \text{ мг/м}^3$.

Поскольку $\frac{M_{\text{з}} F_{\text{з}}}{c_{\text{з}}} = \frac{658,37 \cdot 2}{0,5} > \frac{M_{\text{SO}_2} F_{\text{SO}_2}}{c_{\text{S}}} = \frac{789 \cdot 1}{0,5}$, то расчет высоты дымовой трубы ведется по выбросу летучей золы (здесь $c_{\text{з}}$ и c_{S} — допустимые концентрации золы и серы).

Принимаем температуру газов на выходе из трубы $t_{\text{г}} = 150^\circ \text{С}$, коэффициент избытка воздуха (с учетом присосов) $\alpha_{\text{в}} = 1,45$ и подсчитываем полный объем продуктов сгорания:

$$V_1 = B_{\text{ТЭЦ}}^{\text{р}} [V_0^{\text{т}} + 1,016 V_0 (\alpha_{\text{в}} - 1)] \frac{T_{\text{г}}}{T_0} = 474,03 \cdot 10^3 [3,72 + 1,016 \cdot 3,13 (1,45 - 1)] \frac{273 + 150}{273} = 3\,783\,363 \text{ м}^3/\text{ч} = 1051 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Принимаем диаметр устья трубы $D = 6 \text{ м}$. Скорость газов на выходе из трубы $w_0 = \frac{4 V_1}{\pi D^2} = \frac{4 \cdot 1051}{3,14 \cdot 36} = 37,2 \text{ м/с}$.

По справочным данным «Строительная климатология и геофизика» (СНИП II-A6-72) средняя температура в 13 ч наиболее жаркого месяца

для г. Троицка $t_n = 23,9^\circ \text{C}$. Средняя температурная разность между газами и атмосферным воздухом

$$\Delta T = 150 - 23,9 \approx 126^\circ \text{C}.$$

Максимально разовая предельно допустимая концентрация летучей золы (нетоксичной пыли) в атмосферном воздухе согласно «Санитарным нормам проектирования» (СН 245-71) ПДК_з = 0,5 мг/м³. Фоновая концентрация отсутствует: $c_{\text{ф}} = 0$.

Высота дымовой трубы при неблагоприятных метеорологических условиях связана с максимальной приземной концентрацией выбросов

вредных веществ уравнением [10] $c_m = \frac{AMFmn}{H^2 \sqrt[3]{V_1 \Delta T}}$, мг/м³. Так как

c_m не должно превышать значения предельно допустимой концентрации данного вредного вещества (ПДК), то высота дымовой трубы

$$H = \sqrt[3]{\frac{AMFmn}{\text{ПДК} \sqrt[3]{V_1 \Delta T}}}, \text{ м, где } A \text{ — коэффициент, зависящий от геогра-}$$

фического расположения источника выбросов; M — масса вредных веществ, выбрасываемых из трубы, г/с; V_1 — объем выбрасываемых газов, м³/с; ΔT — разность температур газов и окружающего воздуха, °C; F , m , n — коэффициенты.

Поскольку коэффициенты m и n зависят от высоты трубы, задача решается методом последовательных приближений или графо-аналитическим методом. Ниже приводится последний метод.

Коэффициент $A = 160$, с^{2/3}мг · К^{1/3}/г (по справочным данным для района Урала); $F = 2$ (для пыли и золы с коэффициентом улавливания $\eta_{\text{зв}} > 90\%$).

Задаемся высотами трубы $H_1 = 50$ м; $H_2 = 60$ м; $H_3 = 70$ м и определяем коэффициент m :

$$m = \frac{1}{0,67 + 0,1 \sqrt{f} + 0,34 \sqrt[3]{f}},$$

где $f = 10^3 \frac{w_0^2 D}{H^2 \Delta T}$. Для каждого H находим значение f , а затем m :

$$f_1 = 26,35; f_2 = 18,3; f_3 = 13,44;$$

$$m_1 = 0,456; m_2 = 0,502; m_3 = 0,542.$$

Определяем коэффициент n . Предварительно находим значения коэффициента v_m по формулам

$$v_m = 0,65 \sqrt[3]{\frac{V_1 \Delta T}{H}};$$

$$v_{m1} = 0,65 \sqrt[3]{\frac{1051 \cdot 126}{50}} = 8,97;$$

$$v_{m2} = 0,65 \sqrt[3]{\frac{1051 \cdot 126}{60}} = 8,44;$$

$$v_{м3} = 0,65 \sqrt[3]{\frac{1051 \cdot 126}{70}} = 8,02;$$

так как по [10] $v_{м} > 2$, то $n_1 = n_2 = n_3 = 1$.

Высота трубы:

$$H_1 = \sqrt{\frac{160 \cdot 658,37 \cdot 2 \cdot 0,456 \cdot 1}{0,5^3 \sqrt{1051 \cdot 126}}} = 61,5 \text{ м};$$

$$H_2 = \sqrt{\frac{160 \cdot 658,37 \cdot 2 \cdot 0,502 \cdot 1}{0,5^3 \sqrt{1051 \cdot 126}}} = 64,54 \text{ м};$$

$$H_3 = \sqrt{\frac{170 \cdot 658,37 \cdot 0,542 \cdot 1}{0,5^3 \sqrt{1051 \cdot 126}}} = 67,1 \text{ м}.$$

Найденные значения высот трубы откладывают на графике $H=f(H)$ с одинаковым масштабом по осям координат (рис. 7.1). Точки соединяют плавной кривой, затем проводят биссектрису координатного угла. Точка пересечения биссектрисы и кривой дает искомую минимальную высоту дымовой трубы $H = 66,8 \text{ м} \approx 67 \text{ м}$.

Проверка правильности решения:

$$c_m = \frac{AMFmn}{H^2 \sqrt[3]{V_1 \Delta T}} = \frac{160 \cdot 658,37 \cdot 2 \cdot 0,54}{66,8^2 \sqrt{1051 \cdot 126}} = 0,5 \text{ мг/м}^3,$$

т. е. не превосходит ПДК.

Задача 7.2. Для условий задачи 7.1 определить опасную скорость ветра u_m и расстояние x_m от трубы по оси факела выброса, при которых достигается максимальная концентрация вредных веществ c_m .

Решение. Расстояние от трубы, на котором достигается максимальная концентрация вредных веществ, $x_m = dH$, где d — безразмерная величина, зависящая от параметра v_m ; H — высота трубы, м.

При $v_m \leq 2$ $d \rightarrow = 4,95 v_m (1 + 0,28 \sqrt[3]{f})$;

при $v_m > 2$ $d \rightarrow = 7 \sqrt{v_m} (1 + 0,28 \sqrt[3]{f})$.

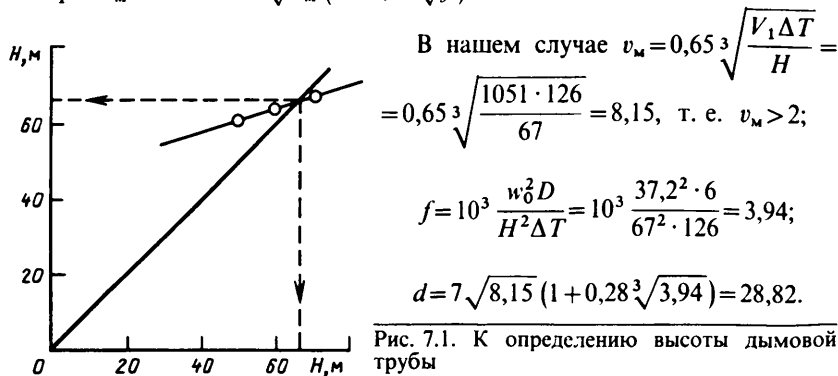


Рис. 7.1. К определению высоты дымовой трубы

Так как безразмерный коэффициент $F \geq 2$, то

$$x_m = \frac{(5-F)}{4} dH = \frac{5-2}{4} 28,82 \cdot 67 = 1448,2 \text{ м.}$$

Опасная скорость ветра на уровне флюгера u_m при $v_m > 2$ определяется по формуле

$$u_m = v_m (1 + 0,12 \sqrt{f}) = 8,15 (1 + 0,12 \sqrt{3,94}) = 10,09 \text{ м/с.}$$

Примечание: при $v_m \leq 0,5$ $u_m \rightarrow 0,5$;

при $0,5 < v_m \leq 2$ $u_m \rightarrow v_m$.

Задача 7.3. Применительно к условию задачи 7.1 определить высоту дымовой трубы, если фоновая концентрация нетоксичной пыли в приземном слое атмосферы $c_\phi = 0,15 \text{ мг/м}^3$.

Решение. Определяем предварительно высоту дымовой трубы по формуле

$$H = \sqrt{\frac{AMF}{(\text{ПДК} - c_\phi)^3 \sqrt{V_1 \Delta T}}} = \sqrt{\frac{160 \cdot 658,37 \cdot 2}{(0,5 - 0,15)^3 \sqrt{1051 \cdot 126}}} = 108,67 \text{ м.}$$

$$\text{Безразмерный коэффициент } f = 10^3 \frac{w_0^2 D}{H^2 \Delta T} = 10^3 \frac{37,2^2 \cdot 6}{108,67^2 \cdot 126} = 5,58;$$

$$m = \frac{1}{0,67 + 0,1 \sqrt{f} + 0,34^3 \sqrt{f}} = 0,75;$$

$$v_m = 0,65^3 \sqrt{\frac{V_1 \Delta T}{H}} = 0,65^3 \sqrt{\frac{1051 \cdot 126}{108,67}} = 6,94;$$

так как $v_m > 2$, то $n = 1$.

Первое уточнение высоты трубы:

$$H' = \sqrt{\frac{160 \cdot 658,37 \cdot 2 \cdot 0,750}{(0,5 - 0,15)^3 \sqrt{1051 \cdot 126}}} = 94 \text{ м;}$$

$$f' = 10^3 \frac{w_0^2 D}{H'^2 \Delta T} = 10^3 \frac{37,2^2 \cdot 6}{94^2 \cdot 126} = 7,46;$$

$$m' = \frac{1}{0,67 + 0,1 \sqrt{7,46} - 0,34^3 \sqrt{7,46}} = 0,622; \quad n' = 1;$$

$$H'' = H' \sqrt{\frac{m_i}{m_{i-1}}} = 94 \sqrt{\frac{0,622}{0,75}} = 85,6 \text{ м;}$$

$$f'' = 10^3 \frac{w_0^2 D}{H''^2 \Delta T} = 10^3 \frac{37,2^2 \cdot 6}{85,6^2 \cdot 126} = 8,99;$$

$$m'' = \frac{1}{0,67 + 0,1\sqrt{8,99} + 0,34^3\sqrt{8,99}} = 0,596; \quad n'' = 1;$$

$$H''' = H'' \sqrt{\frac{m''}{m'}} = 85,6 \sqrt{\frac{0,596}{0,622}} = 83,8 \text{ м.}$$

Дальнейшее уточнение дает $H \approx 83 \text{ м.}$

Задача 7.4. Определить предельно допустимый расход сжигаемого на электростанции подмосковного угля (ПДТ). Высота дымовой трубы $H=120 \text{ м}$; $D=7 \text{ м}$; $w_0=25 \text{ м/с}$; средняя разность температур между дымовыми газами и атмосферным воздухом $\Delta T=130^\circ \text{ С}$. Предельно допустимая концентрация летучей золы и диоксида серы $\text{ПДК}_z = \text{ПДК}_{\text{SO}_2} = 0,5 \text{ г/м}^3$. Коэффициент избытка воздуха в котле $\alpha_a=1,4$; $\eta_{zy}=0,98$.

Указание к решению задачи:

$$\text{ПДТ} = 3,6H^3 \sqrt{\left(\frac{\text{ПДК}}{d_1 A F m}\right)^3 d_2 \Delta T}, \quad \text{т/ч},$$

где d_1 — количество выбрасываемого в атмосферу вредного вещества на единицу массы топлива, г/кг ; d_2 — количество газовой смеси, выделяющейся на единицу массы топлива, $\text{м}^3/\text{кг}$. Обозначения остальных величин те же, что и в задаче 7.1.

Решение. В соответствии с характеристиками топлива (подмосковного угля) $V_0^g=3,35 \text{ м}^3/\text{кг}$; $V_0=2,72 \text{ м}^3/\text{кг}$ (при $T=273 \text{ К}$, $p=0,102 \text{ МПа}$); $S^p=2,4\%$ — сера, $A^p=27\%$ — зола; $A=120$; $F=2$; $t_{\text{возд}}=22^\circ \text{ С}$;

$$m = \frac{1}{0,67 + 0,1\sqrt{2,337} + 0,34^3\sqrt{2,337}} = 0,597;$$

$$f = 10^3 \frac{25^2 \cdot 7}{120^2 \cdot 130} = 2,337.$$

Удельный расход выбрасываемой золы

$$d_{1z} = A^p (1 - \eta_{zy}) \cdot 10^3 = 0,27 \cdot 0,02 \cdot 10^3 = 5,4 \text{ г/кг.}$$

Удельный расход выбрасываемого диоксида серы

$$d_{1\text{SO}_2} = S^p \frac{64}{32} \cdot 10^3 = 0,024 \cdot 2 \cdot 10^3 = 48 \text{ г/кг.}$$

Удельный расход газов

$$d_2 = [3,35 + 1,016 \cdot 2,72 (1,4 - 1)] \frac{273 + 152}{273} = 6,92 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$\text{ПДТ} = 3,6 \cdot 120^3 \sqrt{\left(\frac{0,5}{48 \cdot 120 \cdot 2 \cdot 0,597}\right)^3 \cdot 6,92 \cdot 130} = 115,7 \text{ т/ч (по SO}_2\text{)}.$$

Задача 7.5. Определить максимальную приземную концентрацию диоксида фосфора при выбросе холодной газовой смеси из вытяжной трубы завода по производству фосфорных удобрений. Высота трубы $H=25$ м. Устье трубы имеет прямоугольное сечение размером 3×2 м. Количество выбрасываемого в атмосферу диоксида фосфора $M_{\phi}=5$ г/с, скорость выхода газовой смеси из трубы $w_0=10$ м/с. Предприятие по производству удобрений расположено в Казахстане.

Решение. Искомую концентрацию для холодных выбросов вредного вещества из источника с круглым устьем находят по формуле [16]

$$c_m = \frac{AMFn}{H^{4/3}} k,$$

где $k = \frac{D}{8V_1}$, с/м²; n — коэффициент, зависящий от $v_m = 1,3w_0D/H$.

Для источников выбросов с прямоугольным устьем $D = D_{\text{эк}} = \frac{2L_{\text{в}}}{L+b}$,

где L — длина устья; b — ширина устья; $D_{\text{эк}} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 2}{3+2} = 2,4$ м;

$$V_1 = V_{1\text{эк}} = \frac{\pi D_{\text{эк}}^2}{4} w_0;$$

$$V_{1\text{эк}} = \frac{\pi \cdot 2,4^2}{4} \cdot 10 = 45,21 \text{ м}^3/\text{с}; \quad v_m = 1,3 \frac{10 \cdot 2,4}{25} = 1,345;$$

$$k = \frac{2,4}{8 \cdot 45,21} = 6,63 \cdot 10^{-3}.$$

Так как $0,3 < v_m \leq 2$, то $n = 3 - \sqrt{(v_m - 0,3)(4,36 - v_m)} = 1,345$.

Для Казахстана $A=200$; $F=1$ (газообразные выбросы); $c_m = \frac{200 \times 5 \cdot 1 \cdot 1,345}{25^{4/3}} \rightarrow$
 $\rightarrow \frac{1345}{25^{4/3}} \cdot 6,63 \cdot 10^{-3} = 0,121 \text{ мг/м}^3$, что менее значения ПДК для диоксида фосфора. ПДК_ф=0,15 мг/м³.

Задача 7.6. Для условий задачи 7.5 определить опасную скорость ветра u_m и расстояние от источника выброса x_m , при которых достигается максимальная приземная концентрация диоксида фосфора.

Ответ: $u_m = v_m = 1,345$ м/с; $x_m = dv_m H = 383,3$ м.

Задача 7.7. Определить предельно допустимый выброс (ПДВ) летучей золы из дымовой трубы высотой $H=180$ м с диаметром устья $D=7$ м, если фоновая концентрация нетоксичной пыли в воздухе $c_{\phi}=0,15$ мг/м³. Разность температур между газовой смесью и атмосферным воздухом $\Delta T=150^\circ \text{C}$. Объемный расход газовой смеси, выбрасываемой из трубы, $V_1=900$ м³/с. Предприятие расположено в Московской области.

Решение. При условии непревышения максимальной концентрации вредных веществ в приземном слое атмосферы при неблагоприятных метеорологических условиях предельно допустимый выброс вредного вещества равен массе выбрасываемого вещества: $\text{ПДВ} = M$, г/с.

С учетом фоновой концентрации ($\text{ПДК} - c_\phi$)

$$\text{ПДВ} = \frac{H^2 (\text{ПДК} - c_\phi)^3 \sqrt{V_1 \Delta T}}{A F m n},$$

где $A = 120 \text{ с}^{2/3} \cdot \text{мг} \cdot \text{К}^{1/3} / \text{г}$; $F = 2$; $w_0 = \frac{V_1 \cdot 4}{\pi D^2} = \frac{3600}{3,14 \cdot 49} = 23,4 \text{ м/с}$;

$$f = 10^3 \frac{w_0^2 D}{H^2 \Delta T} = \frac{547,1 \cdot 7}{32 \cdot 400 \cdot 150} = 0,788;$$

$$m = \frac{1}{0,67 + 0,1 \sqrt{f} + 0,34 \sqrt[3]{f}} = \frac{1}{0,67 + 0,1 \sqrt{0,788} + 0,34 \sqrt[3]{0,788}} = \frac{1}{1,073} = 0,932;$$

$$v_m = 0,65 \sqrt[3]{\frac{V_1 \Delta T}{H}} = 0,65 \sqrt[3]{\frac{900 \cdot 150}{180}} = 5,916;$$

$v_m > 2$, следовательно, $n = 1$;

$$\text{ПДВ} = \frac{180^2 (0,5 - 0,15)^3 \sqrt[3]{900 \cdot 150}}{120 \cdot 2 \cdot 0,932} = 2600 \text{ г/с} = 9,36 \text{ т/ч}.$$

Задача 7.8. Определить приземную максимальную концентрацию летучей золы c_m , мг/м^3 , выбрасываемой из многоствольной трубы ТЭЦ. Количество стволов $N = 3$. Высота многоствольной трубы $H = 150 \text{ м}$. Диаметр устья ствола $D = 4 \text{ м}$. Суммарный выброс летучей золы из многоствольной трубы $M = 8,5 \text{ т/ч}$. Объем выходящей газовой смеси $V_1 = 2000 \text{ м}^3/\text{с}$. Разность между температурой выбрасываемой газовой смеси и температурой окружающего атмосферного воздуха $\Delta T = 130^\circ \text{ С}$. Расстояние между центрами устьев стволов $l = 5 \text{ м}$. Место расположения станции — Москва; $A = 120$.

Решение. Приземная максимальная концентрация вредных веществ c_m при выбросах через многоствольную трубу определяется по формуле [2]

$$c_m = c_m'' + d_1 (c_m' - c_m''),$$

где c_m'' — приземная максимальная концентрация, мг/м^3 , вычисляемая по формуле $c_m'' = \frac{A M F m n}{H^2 \sqrt[3]{V_1 \Delta T}}$, в которой $V_1 = V_{1, \text{кв}} = \frac{\pi D_{\text{кв}}^2}{4} w_0$; здесь

w_0 — средняя скорость выхода газов из трубы, м/с ; M — суммарный выброс вредных веществ из всех стволов, г/с ; $D_{\text{кв}} = \left(\frac{2 + N}{3} \right) D$,

(N — число стволов); c_m' — приземная максимальная концентрация вредных веществ, мг/м^3 , вычисляемая по той же формуле при значениях параметров выброса для одного ствола и количестве вредных веществ M , г/с , равном суммарному выбросу вредных веществ из всех стволов; d_1 — безразмерный коэффициент, определяемый по формуле

$d_1 = \frac{l - D}{d_2 H - D}$. Здесь d_2 — безразмерный коэффициент, определяемый по

формуле $d_2 = 0,2 \left[0,3 \left(\frac{v'_m}{u'_m} \right)^3 \sqrt[3]{f} + 0,17 \left(\frac{v'_m}{u'_m} \right)^3 \right]$ в зависимости от параметров f и v'_m/u'_m , которые находятся по тем же зависимостям, что и в задаче 7.2, по параметрам выброса одного ствола.

Определяем параметры f' , v'_m , u'_m , m , n при параметрах выброса одного ствола:

$$w_0 = \frac{V_1}{3} : \frac{\pi D^2}{4} = \frac{2000 \cdot 4}{3 \cdot \pi \cdot 16} = 53,08 \text{ м/с};$$

$$f' = 10^3 \frac{w_0^2 D}{H^2 \Delta T} = 10^3 \frac{53,08^2 \cdot 4}{150^2 \cdot 130} = 3,85;$$

$$m' = \frac{1}{0,67 + 0,1 \sqrt{f} + 0,34 \sqrt[3]{f'}} = \frac{1}{0,67 + 0,1 \sqrt{3,85} + 0,34 \sqrt[3]{3,85}} = 0,716;$$

$$v'_m = 0,65 \sqrt[3]{\frac{V_1 \Delta T}{H}} = 0,65 \sqrt[3]{\frac{666,6 \cdot 130}{150}} = 5,4; \quad n = 1;$$

$$c'_m = \frac{120 \cdot 2 \cdot 2361 \cdot 0,716}{150^2 \sqrt[3]{666,6 \cdot 130}} = 0,407 \text{ мг/м}^3;$$

$$u'_m = v'_m (1 + 0,12 \sqrt{f}) = 5,4 (1 + 0,12 \sqrt{3,85}) = 6,67;$$

$$D_{\text{экв}} = \frac{2+N}{3} D = \frac{2+3}{3} \cdot 4 = 6,67 \text{ м};$$

$$V_{1\text{экв}} = \frac{\pi D_{\text{экв}}^2}{4} w_0 = \frac{3,14 \cdot 6,67^2 \cdot 53,08}{4} = 1853,7 \text{ м}^3/\text{с};$$

$$f'' = 10^3 \frac{w_0^2 D_{\text{экв}}}{H^2 \Delta T} = 10^3 \frac{53,08 \cdot 6,67}{150^2 \cdot 130} = 6,42;$$

$$m'' = \frac{1}{0,67 + 0,1 \sqrt{6,42} + 0,34 \sqrt[3]{6,42}} = 0,643; \quad n = 1;$$

$$c''_m = \frac{120 \cdot 2 \cdot 2361 \cdot 0,643}{150^2 \sqrt[3]{1853 \cdot 130}} = 0,260 \text{ мг/м}^3;$$

$$d_2 = 0,2 \left[0,3 \left(\frac{5,4}{6,67} \right)^3 \sqrt[3]{3,85} + 0,17 \left(\frac{5,4}{6,67} \right)^3 \right] = 0,09;$$

$$d_1 = \frac{l-D}{d_2 H - D} = \frac{5-4}{0,09 \cdot 150 - 4} = 0,105;$$

$c_m = 0,260 + 0,105 (0,407 - 0,260) = 0,275 \text{ мг/м}^3$, что ниже ПДК.

Задача 7.9. Для условий задачи 7.8 определить расстояние x_m и опасную скорость ветра u_m , при которых достигается максимальная концентрация вредных веществ c_m , мг/м³.

Решение. Расстояние, на котором достигается максимальная концентрация вредных веществ,

$$x_m = x''_m + d_1 (x'_m - x''_m),$$

где x'_m — расстояние, на котором наблюдается максимальная концентрация вредных веществ при параметрах выброса для одного ствола, м; x''_m — расстояние, при котором достигается максимальная концентрация вредных веществ при $D = D_{\text{экв}}$ и $V_1 = V_{1\text{ экв}}$: $x'_m = d' H$,
Здесь при $v'_m = 5,4$ ($v_m > 2$) $d' = 7 \sqrt{v'_m (1 + 0,28 \sqrt[3]{f'})} = 7 \sqrt{5,4 (1 + 0,28 \sqrt[3]{3,85})} = 41,76$;

$$x'_m = 41,76 \cdot 150 = 6264 \text{ м};$$

$$x''_m = d'' H; \quad v''_m = 0,65 \sqrt[3]{\frac{V_{1\text{ экв}} \Delta T}{H}} = 0,65 \sqrt[3]{\frac{1853,7 \cdot 130}{150}} = 7,6;$$

$$d'' = 7 \sqrt{v''_m (1 + 0,28 \sqrt[3]{f})} = 7 \sqrt{7,6 (1 + 0,28 \sqrt[3]{6,42})} = 29,34;$$

$$x''_m = 29,34 \cdot 150 = 4401 \text{ м};$$

$$x_m = 4401 + 0,105 (6264 - 4401) = 4596,6 \text{ м};$$

$$u_m = u''_m + d_1 (u'_m - u''_m); \quad u''_m = v''_m (1 + 0,12 \sqrt[3]{f''}) =$$

$$= 7,6 (1 + 0,12 \sqrt[3]{6,42}) = 9,91 \text{ м/с};$$

$$u_m = 9,91 + 0,105 (6,67 - 9,91) = 9,57 \text{ м/с}.$$

Задача 7.10. Определить максимальную приземную концентрацию нетоксичной пыли, выбрасываемой из закрытого механизированного угольного склада топлива длиной $L = 40$ м. Скорость выхода газовой смеси из аэрационного фанаря $w_0 = 1,5$ м/с. Объем выбрасываемой газовой смеси из аэрационного фанаря $V_1 = 180$ м³/с. Масса выбрасываемой нетоксичной пыли $M = 10,8$ кг/ч. Расстояние от земли до верхней кромки аэрационного фанаря $H = 15$ м. Склад размещается в европейской части СССР (коэффициент $A = 120$).

Решение. Аэрационный фанарь разбиваем на N одинаковых участков, каждый из которых заменяем одиночным источником выброса. Максимальная концентрация вредных веществ для каждого

участка $c_m = \frac{c'_m}{N}$, где $c'_m = \frac{AMFn}{H^{4/3}} k$ — максимальная концентрация вредных веществ для одиночного источника холодных выбросов с круглым устьем диаметром $D_{\text{экв}} = \frac{2LV_1}{L^2 w_0 + V_1}$ и эквивалентным объемом газовой

душной смеси $V_{1\text{ экв}} = \frac{\pi D_{\text{экв}}^2}{4} w_0$. При этом масса выбрасываемых вредных веществ одиночным источником принимается равной суммарному выбросу из всего фанаря. Определяем значения величин, входящих в эти выражения:

$$D_{\text{эв}} = \frac{2 \cdot 40 \cdot 180}{40^2 \cdot 1,5 + 180} = 5,58 \text{ м};$$

$$v_{1 \text{ эв}} = \frac{3,14 \cdot 5,58^2}{4} \cdot 1,5 = 36,68 \text{ м}^3/\text{с};$$

$F=1$ (мелкодисперсная пыль с низкой скоростью оседания);

$$v_m = 1,3 \frac{w_0 D_{\text{эв}}}{4} = 1,3 \frac{1,5 \cdot 5,58}{15} = 0,725; \quad 0,3 \leq v_m < 2;$$

$$n = 3 - \sqrt{(v_m - 0,3)(4,36 - v_m)} = 1,76;$$

$$k = \frac{D_{\text{эв}}}{8 \cdot v_{1 \text{ эв}}} = \frac{5,58}{8 \cdot 36,68} = 0,019;$$

$$c'_m = \frac{120 \cdot \frac{10,8 \cdot 10^3}{3600} \cdot 1,76}{15^{4/3}} \cdot 0,019 = 0,325 \text{ мг/м}^3.$$

Поскольку приземная концентрация вредного вещества в любой точке местности при наличии N близко расположенных источников определяется как сумма концентраций вредных веществ в этой точке от отдельных источников, то $c_m = c'_m = 0,325 \text{ мг/м}^3$, что не превышает ПДК.

Расстояние, при котором достигается максимальная концентрация c'_m $x_m = x'_m = dH$; при $v_m \leq 2$ $d = 11,4 v_m$; $x'_m = 11,4 \cdot 0,725 \cdot 15 = 123,975 \text{ м}$.

Опасная скорость ветра (при $0,5 \leq v_m \leq 2$), при которой достигается максимальная приземная концентрация вредных веществ, $u_m = v'_m = v_m = 0,725 \text{ м/с}$.

Задача 7.11. Для условий задачи 7.10 определить концентрацию вредных выбросов в приземном слое атмосферы и расстояние от источника выброса, на котором достигается искомая концентрация при скорости ветра $u=4 \text{ м/с}$ вдоль аэрационного фонаря.

Решение. Концентрация вредных выбросов $c_m = S_3 c'_m$, где $S_3 = \frac{1 + 0,45L/x'_m}{1 + 0,45L/x'_m + 0,1(L/x'_m)^2}$ — безразмерный коэффициент:

$$S_3 = \frac{1 + 0,45 \frac{40}{123,97}}{1 + 0,45 \frac{40}{123,97} + 0,1 \left(\frac{40}{123,97} \right)^2} = \frac{1,144}{1,144 + 0,010} = 0,991;$$

$$c_m = 0,325 \cdot 0,991 = 0,322 \text{ мг/м}^3;$$

$x_m = \frac{L}{2} + x_4 x'_m$, где $x_4 = \frac{1}{1 + 0,6L/x'_m}$ — безразмерный коэффициент;

$$x_4 = \frac{1}{1 + 0,6(40/123,97)} = \frac{1}{1 + 0,193} = 0,838;$$

$$x_m = \frac{40}{2} + 0,833 \cdot 123,97 = 123,88 \text{ м.}$$

Задача 7.12. Определить зону активного загрязнения (ЗАЗ) вредными выбросами из дымовой трубы ТЭЦ высотой $H=120$ м. Среднегодовая разность температур между окружающей средой и газовоздушной смесью на уровне устья трубы $\Delta T=128^\circ \text{С}$.

Решение. При высоте источника выброса $H \geq 10$ м ЗАЗ представляет собой кольцо, заключенное между окружностями с радиусами $r_{\text{вн}} = 2\varphi H$ и $r_{\text{внеш}} = 20\varphi H$, где $\varphi = 1 + \Delta T/75$ — безразмерная поправка на подъем факела выброса в атмосферу:

$$\varphi = 1 + \frac{128}{75} = 2,706;$$

$$r_{\text{вн}} = 2 \cdot 2,706 \cdot 120 = 649,6 \text{ м; } r_{\text{внеш}} = 20 \cdot 2,706 \cdot 120 = 6496 \text{ м.}$$

Площадь ЗАЗ

$$S_{\text{ЗАЗ}} = \pi (r_{\text{внеш}}^2 - r_{\text{вн}}^2) = 1,311767 \cdot 10^8 \text{ м}^2 = 131,17 \text{ км}^2.$$

Примечание. При высоте источника выбросов $H \leq 10$ м ЗАЗ представляет собой круг с центром в точке расположения источника и с радиусом $r=50H$.

Задача 7.13. Определить приведенную массу годового выброса загрязнений в атмосферу из дымовых труб ТЭЦ, работающей на подмосковном угле. Среднечасовой выброс летучей зоны $m_3=7,2$ т/ч, а диоксида серы $m_{\text{SO}_2}=15,0$ т/ч. Продолжительность работы ТЭЦ $\tau=8000$ ч/год.

Решение. Приведенная масса годового выброса в атмосферу, усл.т/год, $M = \sum_{i=1}^n m_i A_i$, где A_i — показатель относительной агрессивности i -го вида выброса загрязнений в атмосферу из источника, усл.т/т (величина, определяемая по справочным данным [4]); m_i — масса годового выброса i -го вида, т/год.

Для золы подмосковного угля $A_3=70$ усл.т/т; диоксида серы $A_{\text{SO}_2}=16,5$ (см. приложения 7, 8);

$$M = A_3 m_3 + A_{\text{SO}_2} m_{\text{SO}_2} = 8000 (70 \cdot 7,2 + 16,5 \cdot 15,0) = 6,012 \cdot 10^6 \text{ усл.т/год.}$$

Задача 7.14. Произвести оценку (по укрупненным показателям) экономического ущерба от загрязнения атмосферы выбросами из дымовых труб электростанции, расположенной в зоне промышленных предприятий общей площадью активного загрязнения $S_{\text{ЗАЗ}}=100 \text{ км}^2$. В общую площадь активного загрязнения попадает пригородная зона с садоводческими кооперативами на 20 га. Высота дымовых труб $H=100$ м. Среднегодовая скорость ветра $u=4$ м/с, а разность температур между атмосферой и дымовыми газами на уровне устья трубы $\Delta T=130^\circ \text{С}$. Годовой выброс летучей золы из всех труб $m_3=20\,000$ т/год, диоксида серы $m_{\text{SO}_2}=45\,600$ т/год. Показатели относительной агрессивности вредных веществ в дымовых газах — для золы $A_3=70$ усл.т/т; для SO_2 $A_{\text{SO}_2}=16,5$ усл.т/т.

Решение. Ущерб, причиняемый газовыми выбросами загрязнений в атмосферу, руб/год, определяется по формуле

$$Y = 2,4 \sigma f M,$$

где σ — безразмерный коэффициент, зависящий от характера загрязняемой территории; f — безразмерный коэффициент, определяемый в зависимости от характера рассеивания примесей в атмосфере; M — приведенная масса годового выброса загрязнений из источника, усл.т/год; 2,4 — константа, руб/усл.т.

Поскольку характер рассеивания летучей золы и SO_2 различен, общий ущерб следует находить по формуле

$$Y = 2,4\sigma(f_3 M_3 + f_{\text{SO}_2} M_{\text{SO}_2}).$$

При неоднородной зоне активного загрязнения (ЗАЗ)

$\sigma_{\text{ЗАЗ}} = \frac{1}{S_{\text{ЗАЗ}}} \sum S_i \sigma_i$, где S_i — площадь i -й части ЗАЗ; σ_i — табличное значение коэффициента σ для i -й части ЗАЗ; i — номер части ЗАЗ, относящийся к одному из видов территории (см. приложение 9).

В нашем случае $\sigma = \sigma_{\text{ЗАЗ}} = \frac{1}{100} [(100 - 0,2) \cdot 4 + 0,2 \cdot 8] = 4,008$.

Для газообразных примесей и мелкодисперсных частиц со скоростью оседания менее 1 см/с $f = \frac{100}{100 + \varphi H} \cdot \frac{4}{1 + u}$. Здесь $\varphi = 1 + \frac{\Delta T}{75}$; H — высота трубы, м; u — скорость ветра, м/с:

$$f_{\text{SO}_2} = \frac{100}{100 + \left(1 + \frac{130}{75}\right) \cdot 100} \cdot \frac{4}{1 + 4} = 0,214.$$

Для частиц, оседающих со скоростью от 1 до 20 м/с,

$$f = \left(\frac{1000}{60 + \varphi H} \right)^{0,5} \cdot \frac{4}{1 + u};$$

$$f_3 = \left(\frac{1000}{60 + \left(1 + \frac{130}{75}\right) \cdot 100} \right)^{0,5} \cdot \frac{4}{1 + 4} = 1,38.$$

Приведенная масса сернистого газа

$$M_{\text{SO}_2} = A_{\text{SO}_2} m_{\text{SO}_2} = 16,5 \cdot 45\,600 = 752\,400 \text{ усл.т/год.}$$

Приведенная масса летучей золы

$$M_3 = A_3 m_3 = 70 \cdot 20\,000 = 1\,400\,000 \text{ усл.т/год;}$$

$$Y = 2,4 \cdot 4,008 (1,38 \cdot 1\,400\,000 + 0,214 \cdot 752\,400) = 20,7 \text{ млн.руб/год.}$$

Задача 7.15. Оценить по укрупненным показателям экономический ущерб, руб/год, наносимый окружающей среде, от загрязнения реки Оки в ее устье сточными водами со станции очистки и нейтрализации ТЭЦ. Годовой сброс воды $Q_{\text{год}} = 800\,000 \text{ м}^3/\text{год}$. Содержание примесей в сточных водах: взвешенных веществ со скоростью оседания менее 0,4 мм/с $c_{\text{в.в}} = 10 \text{ мг/л}$; нефтепродуктов $c_{\text{н.п}} = 0,03 \text{ мг/л}$; сульфатов $c_{\text{SO}_4} = 120 \text{ мг/л}$, хлоридов $c_{\text{Cl}} = 75 \text{ мг/л}$.

Решение. Экономическая оценка годового ущерба (руб/год) от годичного сброса загрязняющих примесей в водохозяйственный участок определяется по формуле

$$Y = 144 \sigma_x M,$$

где σ_x — константа, зависящая от вида водохозяйственного участка, безразмерная (берется по приложению 10): $\sigma_x = 2,6$; M — приведенная масса годового сброса примесей в водохозяйственный участок,

усл.т/год; $M = \sum_{i=1}^N A_i m_i$, где A_i — показатель относительной опасности сброса i -го вещества в водоемы, усл.т/т; A_i может быть взята по данным приложения 11, либо вычислена по формуле $A_i = \frac{1}{\text{ПДК}_{p/x}}$,

где $\text{ПДК}_{p/x}$ — предельно допустимая концентрация i -го вредного вещества в воде объектов рыбохозяйственного пользования (данные по $\text{ПДК}_{p/x}$ приведены в приложении 11); m_i — общая масса годового сброса i -й примеси, т/год;

$$M = A_{\text{в.в.}} m_{\text{в.в.}} + A_{\text{н.п.}} m_{\text{н.п.}} + A_{\text{SO}_4} m_{\text{SO}_4} + A_{\text{Cl}} m_{\text{Cl}} = 800\,000 \cdot 10^{-6} (0,05 \cdot 10 + 20,0 \cdot 0,03 + 0,002 \cdot 120 + 0,003 \cdot 75) = 4,852 \text{ усл.т/год};$$

$$Y = 144 \cdot 2,6 \cdot 4,852 = 1816,59 \text{ руб/год}.$$

Задача 7.16. Определить годовой ущерб, причиняемый населению шумами, действующими на людей в условиях жилых помещений от работающей поблизости ТЭЦ. Число жителей, проживающих на расчетной территории, $N = 50$ тыс. чел. Суммарный эквивалентный уровень звука при осреднении за годовое ночное и дневное время в жилых помещениях $L_{\text{экв. н. общ}}^A = L_{\text{экв. д. общ}}^A = 40,2$ дБА (в децибелах по шкале А стандартного шумомера).

Решение. Экономическая оценка годового ущерба, причиняемого населению шумами в условиях жилых помещений в соответствии с [4], определяется по формулам

$$Y_{\text{общ}} = Y_{\text{н. общ}} + Y_{\text{д. общ}}; \quad (7.1)$$

$$Y_{\text{н. общ}} = \gamma \sum_{L_{\text{н. макс}}}^{L_{\text{н. макс}}} A(L_{\text{н}}) N_{\text{н}}(L_{\text{н}}); \quad (7.2)$$

$$Y_{\text{д. общ}} = \gamma \sum_{L_{\text{д. макс}}}^{L_{\text{д. макс}}} B(L_{\text{д}}) N_{\text{д}}(L_{\text{д}}), \quad (7.3)$$

где $Y_{\text{н. общ}}$ — экономическая оценка годового ущерба, причиняемого населению шумами, действующими на людей в ночное время в условиях жилых помещений, руб/год; $Y_{\text{д. общ}}$ — то же в дневное время, руб/год; $N_{\text{н}}(L_{\text{н}})$ — количество людей, проживающих на расчетной территории в комнатах, в которых суммарный (от всех источников) эквивалентный уровень звука при осреднении за годовое ночное время имеет значение $L_{\text{экв. н. общ}}^A$, дБА, равное (после округления до ближайшего целого) целому числу $L_{\text{н}}$, чел; $N_{\text{д}}(L_{\text{д}})$ — то же при осреднении за годовое дневное время, чел; $A(L_{\text{н}})$ и $B(L_{\text{д}})$ — безразмерные величины, значения которых определяются по формулам

$$A(L_n) = 0,5 \cdot 2^{0,15 L_n} - 6,1 = 10^{0,045155 L_n - 0,301} - 6,1;$$

$$B(L_d) = 2^{0,1 L_d} - 5,3 \approx 10^{0,0301 L_d} - 5,3;$$

затабулированные значения величин $A(L_n)$ и $B(L_d)$ приведены в приложении 15; $L_{n. \max}$ — безразмерная величина, численно равная максимальному значению $L_{\text{экв. н. общ}}$, дБА, в жилых помещениях на расчетной территории, округленному до ближайшего целого числа; $L_{d. \max}$ — аналогичная величина, численно равная максимальному значению $L_{\text{экв. д. общ}}$, дБА, округленному до ближайшего целого числа; γ — множитель, руб/(чел·год); рекомендуется принимать численное значение, равное 1.

По исходным данным и приложению 15 находим $A(L_n) = 25,9$ (при округлении $L_{\text{экв. н. общ}}$ до 40,0 дБА); $B(L_d) = 10,7$ (при округлении $L_{\text{экв. д. общ}}$ до 40,0 дБА);

$$U_{n. \text{общ}} = 1 \cdot 25,9 \cdot 50 \cdot 10^3 = 1,295 \text{ млн.руб/год};$$

$$U_{d. \text{общ}} = 1 \cdot 10,7 \cdot 50 \cdot 10^3 = 0,535 \text{ млн.руб/год};$$

$$U_{\text{общ}} = U_{n. \text{общ}} + U_{d. \text{общ}} = 1,295 + 0,535 = 1,830 \text{ млн.руб/год}.$$

Задача 7.17. Применительно к условию задачи 7.16 оценить экономическую эффективность мероприятий по снижению уровня шума на ТЭЦ путем установки шумоглушителей на корпусах машин и стенках газовоздушных трактов, обеспечивающих снижение уровня шума в жилых помещениях в дневное и ночное время до $L_{\text{экв. н. общ}}^A = L_{\text{экв. д. общ}}^A = 32$ дБА. Капитальные затраты по шумоглушению на ТЭЦ $K = 70$ тыс. руб. Норма годовых амортизационных отчислений $a = 4,5\%$.

Решение. Годовой ущерб, причиняемый населению шумами после осуществления шумозащитных мероприятий на ТЭЦ,

$$U'_{\text{общ}} = U'_{n. \text{общ}} + U'_{d. \text{общ}} = 1 [A(32) + B(32)] \cdot 50 \cdot 10^3 = (7,8 + 3,9) \cdot 50 \cdot 10^3 = 585 \text{ тыс. руб/год}.$$

Уменьшение годового ущерба за счет осуществления шумозащитных мероприятий

$$\Delta U_{\text{общ}} = U_{\text{общ}} - U'_{\text{общ}} = 1,830 - 0,585 = 1,245 \text{ млн.руб/год}.$$

Годовые затраты по осуществлению шумозащитных мероприятий

$$Z = C + E_n K,$$

где $C = aK$ — текущие годовые издержки (текущий и капитальный ремонт, амортизация); $E_n = 0,12$ — нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений; K — капитальные (единовременные) затраты;

$$Z = 0,045 \cdot 70 + 0,12 \cdot 70 = 11,55 \text{ тыс. руб/год}.$$

Данный пример показывает, что применение шумовой защиты экономически оправдано.

Задача 7.18. На расстоянии 150 м от фасада жилого дома расположена круглосуточно работающая градирня ТЭЦ. В жилых комнатах фасадной стороны дома проживает 250 человек. За счет работы градирни (источника шума J) в жилых комнатах, окна которых выходят на фасадную сторону дома, эквивалентный уровень

ночных шумов повышается от 30 до 38 дБА, а дневных шумов — от 40 до 41 дБА. Определить годовой экономический ущерб, причиняемый населению в жилых комнатах работающей градирней. В комнатах, выходящих на другую сторону дома, повышение суммарного уровня звука за счет работы градирни пренебрежимо мало.

Решение. Экономическая оценка годового ущерба, причиняемого населению источником шума J , определяется по формуле

$$U_{J^{жил}} = U_{н.общ}^{жил} + U_{д.общ}^{жил}, \quad (4)$$

где

$$U_{н.общ}^{жил} = U_{н.общ}^{жил} - U_{н.общ}^{жил(J)^*}, \text{ руб/год}; \quad (5)$$

$$U_{д.общ}^{жил} = U_{д.общ}^{жил} - U_{д.общ}^{жил(J)^*}, \text{ руб/год}; \quad (6)$$

здесь $U_{н.общ}^{жил}$ — годовой ущерб, причиняемый населению всеми шумами в ночное время, руб/год, определяется по формуле (2) (см. задачу 7.16). При этом $L_n = L_{н.общ}^{жил} = 38$ дБА; $U_{д.общ}^{жил}$ — то же при действии всех шумов, в дневное время, руб/год, определяется по формуле (3) (см. задачу 7.16). При этом $L_d = L_{д.общ}^{жил} = 41$ дБА; $U_{н.общ}^{жил(J)^*}$ — годовой ущерб, причиняемый населению шумами в ночное время в случае, если бы источник шума J (в данном случае градирня) не работал, руб/год, определяется по формуле (2). При этом $L_n = L_{н.общ}^{жил(J)^*} = 30$ дБА; $U_{д.общ}^{жил(J)^*}$ — то же, но если бы источник шума J не работал в дневное время, руб/год, определяется по формуле (3). При этом $L_d = L_{д.общ}^{жил(J)^*} = 40$ дБА. Приняв $\gamma = 1$ руб/(чел · год), по данным приложения 16 получаем

$$\begin{aligned} U_{J^{жил}} &= U_{н.общ}^{жил} + U_{д.общ}^{жил} = [U_{н.общ}^{жил} - U_{н.общ}^{жил(J)^*}] + [U_{д.общ}^{жил} - U_{д.общ}^{жил(J)^*}] = \\ &= 1 \{ [250 \cdot A(38) - 250 \cdot A(30)] + [250 \cdot B(41) - 250 \cdot B(40)] \} = \\ &= 250 \{ [(19,8 - 5,2) + (11,9 - 10,7)] \} = 250(14,6 + 1,2) = 3950 \text{ руб/год}. \end{aligned}$$

Задача 7.19. С целью уменьшения шумового воздействия работающей градирней на жителей дома (см. условия задачи 7.18) были выполнены шумозащитные мероприятия, оцениваемые единовременными затратами $K = 2500$ руб. Норма амортизации капитальных затрат $a = 6\%$. В результате шумозащитных мероприятий собственный шум градирни (источника шума J) снизится настолько, что при отсутствии других источников в жилых комнатах, зашумляемых градирней, наблюдались бы уровни звука $\bar{L}_{н.ж} = \bar{L}_{д.ж} = 31$ дБА.

Оценить экономическую эффективность шумозащитных мероприятий.

Решение. Определяем уровни звука $\bar{L}_{н.общ}^{жил}$ и $\bar{L}_{д.общ}^{жил}$ с учетом глушения шума градирни. По правилу сложения уровней звука

$$L_{(J_1 \cup J_2)} = 10 \lg (10^{0,1 L_{J_1}^*} + 10^{0,1 L_{J_2}^*}) \quad (7)$$

находим $\bar{L}_{н.общ}^{жил} = 10 \lg (10^{0,1 \cdot 30} + 10^{0,1 \cdot 31}) = 10 \lg (1000 + 1259) = 10 \lg 2259 = 33,5$ дБА. Здесь $L_{J_1}^*$ и $L_{J_2}^*$ — уровни звука изолированных источников.

Аналогично

$$\begin{aligned} \bar{L}_{д.общ}^{жил} &= 10 \lg (10^{0,1 \cdot 40} + 10^{0,1 \cdot 31}) = 10 \lg (10\,000 + 1259) = \\ &= 10 \lg 11\,259 = 40,5 \text{ дБА}. \end{aligned}$$

Экономическую оценку годового ущерба, причиняемого населению работающей градирней в случае глушения ее шума, определяем по формулам (4)–(6) (см. задачу 7.18):

$$\begin{aligned}\bar{Y}_{J^{жил}} &= \bar{Y}_{н^{жил}} + \bar{Y}_{д^{жил}} = \beta [\bar{Y}_{н.общ}^{жил} - \bar{Y}_{н(общ \cdot J)}^{жил}] + [\bar{Y}_{д.общ}^{жил} - \bar{Y}_{д(общ \cdot J)}^{жил}] = \\ &= 1 \{ [250 \cdot A(33,5) - 250 \cdot A(30)] + [250 \cdot B(40,5) - 250 \cdot B(40)] \} = \\ &= 250 \{ (10,25 - 5,2) + (11,3 - 10,7) \} = 250 \{ 5,05 + 0,6 \} = 1412,5 \text{ руб/год},\end{aligned}$$

где $\beta = 1 \text{ руб/}(\text{чел} \cdot \text{год})$.

Предотвращенный экономический ущерб за счет глушения шума

$$П = 3950 - 1412,5 = 2537,5 \text{ руб/год}.$$

Приведенные годовые затраты на шумозащитные мероприятия

$$З = aK + EK = 0,06 \cdot 2500 + 0,12 \cdot 2500 = 450 \text{ руб/год}.$$

Годовой экономический эффект

$$R = П - З = 2537,5 - 450 = 2087,5 \text{ руб/год}.$$

Срок окупаемости $T = K/П = 2500/2537,5 \approx 1 \text{ год}$.

Задача 7.20. Оценить годовой экономический ущерб, причиняемый населению шумовым загрязнением внешней акустической среды рабочего поселка с населением $N = 10$ тыс. чел. Эквивалентный уровень звука, измеренного с корректировкой по шкале А стандартного шумомера вне жилого здания на расстоянии 2 м от оконных проемов при осреднении за годовое ночное расчетное время $L_{н(экр)}^{нар} = 45,8 \text{ дБА}$, а за годовое дневное расчетное время $L_{д(экр)}^{нар} = 52,1 \text{ дБА}$. В расчетном жилье использованы оконные рамы нешумозащитных конструкций.

Решение. Годовой ущерб, руб/год, причиняемый населению шумовым загрязнением внешней акустической среды населенных мест, определяется по формуле [4]

$$\begin{aligned}U &= U_{н.внш}^{жил} + U_{д.внш}^{жил} = U_{н.внш}^{жил} + 1,3 U_{д.внш}^{жил}; \\ U_{н.внш}^{жил} &= \gamma \sum_{L_n=25}^{L_{н.макс}} A(L_n) N_n(L_n); \\ U_{д.внш}^{жил} &= \gamma \sum_{L_d=25}^{L_{д.макс}} B(L_d) N_d(L_d).\end{aligned}$$

Согласно [4] и исходным данным

$$L_n = L_{н.внш}^{жил} \approx L_{н(экр)}^{нар} - 10 \text{ дБА} = 45,8 - 10 \approx 36 \text{ дБА};$$

$$L_d = L_{д.внш}^{жил} \approx L_{д(экр)}^{нар} - 10 \text{ дБА} = 52,1 - 10 \approx 42 \text{ дБА};$$

$$U_{н.внш}^{жил} = 1 \frac{\text{руб}}{\text{чел} \cdot \text{год}} \cdot 10^4 \cdot A(36) = 10^4 \cdot 15,0 = 150\,000 \text{ руб/год};$$

$$U_{д.внш}^{жил} = 1 \frac{\text{руб}}{\text{чел} \cdot \text{год}} \cdot 10^4 \cdot B(42) = 10^4 \cdot 13,1 = 131\,000 \text{ руб/год};$$

$$U = 150 \cdot 10^3 + 1,3 \cdot 131 \cdot 10^3 = 320,3 \text{ тыс. руб/год}.$$

Задача 7.21. Определить потребный часовой расход охлаждающей воды конденсаторов турбин ТЭЦ номинальной мощностью $N_3 = 1200$ МВт, если 40% вырабатываемой электроэнергии на ТЭЦ производится на отборном паре. Начальные параметры пара на ТЭЦ: $p_0 = 13,0$ МПа; $t_0 = 560^\circ \text{C}$; температура питательной воды $t_{п.в} = 235^\circ \text{C}$. Время использования установленной мощности ТЭЦ $\tau_{уст} = 6000$ ч/год. Среднегодовая температура охлаждающей воды на входе в конденсаторы $t_{вх} = 15^\circ \text{C}$. Давление в конденсаторах $p_k = 4$ кПа. Сухость пара $x = 0,9$. Недогрев воды в конденсаторах $\theta = 2^\circ \text{C}$, конденсат пара не переохлаждается. КПД конденсационного цикла по выработке электроэнергии $\eta_{конд}^{бр} = 0,35$.

Решение. Часовая выработка электроэнергии на ТЭЦ

$$\mathcal{E}_{\text{час}}^{\text{ТЭЦ}} = N_3 \frac{\tau_{\text{уст}}}{8760} = 1200 \cdot 10^3 \frac{6000}{8760} = 821\,918 \text{ кВт} \cdot \text{ч/ч.}$$

Конденсационная выработка электроэнергии

$$\mathcal{E}_{\text{час}}^{\text{конд}} = \mathcal{E}_{\text{час}}^{\text{ТЭЦ}} \cdot 0,6 = 493\,150 \text{ кВт} \cdot \text{ч/ч.}$$

Удельный расход теплоты на выработку электроэнергии конденсационным способом

$$q_{\text{конд}} = \frac{3600}{\eta_{\text{конд}}^{бр}} = \frac{3600}{0,35} = 10285,7 \text{ кДж/(кВт} \cdot \text{ч)}.$$

Удельный расход пара на выработку электроэнергии конденсационным способом

$$d_{\text{конд}} = \frac{q_{\text{конд}}}{h_0 - h'_{п.в}} = \frac{10285,7}{3492 - 984,6} = 4,102 \text{ кг/(кВт} \cdot \text{ч)}.$$

Часовой расход пара в конденсаторы турбин

$$D_k = d_{\text{конд}} \mathcal{E}_{\text{час}}^{\text{конд}} = 4,102 \cdot 493\,150 = 2022,9 \text{ т/ч.}$$

Энтальпия пара в конденсаторе

$h_k = 2310,0$ кДж/кг (по h, s -диаграмме водяного пара при $p_k = 4$ кПа и $x = 0,9$).

Энтальпия и температура конденсата в конденсаторе $h'_k = 120$ кДж/кг; $t_k = 28,6^\circ \text{C}$ (на линии насыщения при $p_k = 4$ кПа). Температура охлаждающей воды на выходе из конденсаторов $t_{вых} = t_k - \theta = 26,6^\circ \text{C}$.

Кратность охлаждения конденсатора

$$m = \frac{W_{о.в}}{D_k} = \frac{h_k - h'_k}{(t_{вых} - t_{вх}) c_p} = \frac{2310 - 120}{(26,6 - 15) 4,19} = 45.$$

Часовой расход охлаждающей воды

$$W_{о.в} = D_k m = 2022,9 \cdot 45 = 91\,030 \text{ т/ч.}$$

Задача 7.22. Определить часовой расход циркуляционной воды и выбрать насосы для ее подачи в конденсаторы паровых турбин тепловой электростанции конденсационной мощностью $N_3 = 600$ МВт.

Кратность охлаждения конденсаторов $m=50$. Насосы располагаются на береговой насосной станции, удаленной от ТЭС на 150 м. Геодезическая высота оси конденсаторов турбин над уровнем воды в водоприемнике $H_r=23$ м. Потеря давления на преодоление гидравлического сопротивления конденсатора $\Delta h_k=15$ кПа. Абсолютная эквивалентная шероховатость трубопровода $K_s=0,5$ мм. Доля местных потерь на гидравлическое сопротивление $\alpha=0,2$. Температура охлаждающей воды $t_n=15$ °С. Начальные параметры пара: $p_0=13,0$ МПа, $t_0=560$ °С. Давление в конденсаторе турбин $p_k=4$ кПа. КПД турбин $\eta_{oi}=0,85$; $\eta_{зм}=0,97$. Влиянием сифонного действия сливных труб пренебречь.

Решение. Расход пара в конденсаторы

$$D_k = \frac{N_3}{H_0 \eta_{oi} \eta_{зм}} = \frac{600 \cdot 10^3}{(3492 - 2000) \cdot 0,85 \cdot 0,97} = 487,74 \text{ кг/с} = 1755,8 \text{ т/ч.}$$

Расход циркуляционной охлаждающей воды

$$W_{o.в} = m D_k = 50 \cdot 1755,8 = 87\,790 \text{ т/ч;}$$

$$Q_{o.в} = 87\,790 \text{ м}^3/\text{ч.}$$

Диаметр напорного водовода

$$d = \sqrt{\frac{4 Q_{o.в}}{\pi w_в}}.$$

Принимаем скорость воды $w_в=3$ м/с;

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot 87\,790}{3,14 \cdot 3,0 \cdot 3600}} = 3,2 \text{ м.}$$

Труб такого диаметра нет. По сортаменту труб выбираем четыре трубы внутренним диаметром $d_{вн}=1392$ мм (наружный диаметр трубы $d_n=1420$ мм).

Расход воды в каждой трубе $G = W_{o.в}/4 = 87\,790/4 = 21947,5$ т/ч.

Фактическая скорость воды $w_в = \frac{4 Q_{o.в}}{\pi d_{вн}^2 \cdot 3600} = 4,0$ м/с.

Линейная удельная потеря давления воды в напорном водоводе [6]

$$R_n = 0,0894 \frac{K_s^{0,25}}{\rho} \frac{G^2}{d_{вн}^{5,25}} = 0,0894 \frac{0,0005^{0,25}}{10^3} \frac{6096,5^2}{1,392^{5,25}} = 13,36 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{37,17 \cdot 10^6}{5,6768} = 87,48 \text{ Па/м.}$$

Полная потеря давления в водоводе

$$\Delta p_{тр} = l(1 + \alpha) R_n = 150(1 + 0,2) \cdot 87,48 = 15836,4 \text{ Па.}$$

Потребный напор насоса

$$H = \frac{\Delta p_{тр}}{\gamma} + \Delta h_k + H_r + \frac{w_в^2}{2g} = \frac{15836,4}{9810} + 1,5 + 23 + \frac{4^2}{2 \cdot 9,8} = 1,614 + 1,5 + 23 + 0,816 = 26,93 \text{ м.}$$

Выбираем по справочным данным [8] четыре центробежных насоса типа В (вертикальный) 1600В-10/40 с подачей по 31 300 м³/ч и напором $H=27,8$ м. Мощность насоса 3000 кВт; КПД 88%. Частота вращения $n=250$ 1/мин. Из четырех насосов один резервный.

Задача 7.23. Рассчитать необходимую площадь оросителя капельной башенной градирни ТЭС конденсационной мощностью $N_3 = 25\,000$ кВт. Удельный расход пара $d_3 = 4,0$ кг/(кВт·ч). Теплота конденсации пара $h_k - h'_k = 2300$ кДж/кг; температура воды в градирне (на входе в конденсатор) $t_{вх} = 24^\circ\text{C}$; температура воды на выходе из конденсатора $t_{вых} = 34^\circ\text{C}$; температура окружающего воздуха (по сухому термометру) $\theta = 18,5^\circ\text{C}$; температура смоченного термометра $\tau = 13^\circ\text{C}$.

Решение. Расход циркуляционной охлаждающей воды в градирне

$$W_{о.в} = mD_k = \frac{h_k - h'_k}{(t_{вых} - t_{вх}) c_p} N_3 d_3 = \frac{2300}{(34 - 24) \cdot 4,19} 25\,000 \cdot 4,0 = 5489,2 \text{ т/ч.}$$

Площадь оросителя $F_{ор} = Q_{о.в}/q$, где q — плотность дождя, м³/(м²·ч); $Q_{о.в} = 5489,2$ м³/ч — объемный расход циркуляционной воды, м³/ч.

Значение q находим с помощью номограммы (рис. 7.2). Штриховой линией со стрелкой показан порядок нахождения q :

$$t_2 \rightarrow \tau/\theta \rightarrow \tau \rightarrow \Delta t \rightarrow q = 2,25 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч});$$

$$t_2 = 24^\circ\text{C}; \tau/\theta = 13/18,5 \approx 0,7; \Delta t = 34 - 24 = 10^\circ\text{C};$$

$$F_{ор} = 5489,2/2,25 = 2439 \text{ м}^2.$$

Задача 7.24. Определить предельную конденсационную мощность ТЭС с прямоточным водоснабжением конденсаторов турбин. Начальные параметры пара на ТЭС: $p_0 = 17$ МПа, $t_0 = 550^\circ\text{C}$. Давление в конденсаторе $p_k = 5$ кПа. Внутренний относительный КПД турбины $\eta_{oi} = 0,85$; $\eta_{эм} = 0,96$. Температура воды в реке $t_{исх} = 18^\circ\text{C}$, а на выходе из конденсатора $t_{вых} = 28^\circ\text{C}$. Расход воды в реке $Q_p = 50,0$ м³/с. Источник водоснабжения является объектом питьевого и культурно-бытового назначения.

Решение. Согласно правилам охраны водных объектов сброс нагретой воды в источник рыбохозяйственного пользования ограничивается пределами, при которых увеличение температуры воды в источнике не должно превышать 3°C .

Тепловой баланс водного источника

$$(Q_p - W_{о.в}) t_{исх} c_p + W_{о.в} t_{вых} c_p = Q_p (t_{исх} + 3) c_p;$$

$$W_{о.в} = \frac{3Q_p}{t_{вых} - t_{исх}} = \frac{3 \cdot 50,0}{28 - 18} = 15,0 \text{ м}^3/\text{с.}$$

Располагаемый теплорепад в турбине

$$H_0 = h_0 - h_{к1} = 3428 - 1960 = 1468 \text{ кДж/кг.}$$

Энтальпия пара в конденсаторе

$$h_k = h_0 - H_0 \eta_{oi} = 3428 - 1468 \cdot 0,85 = 2180 \text{ кДж/кг.}$$

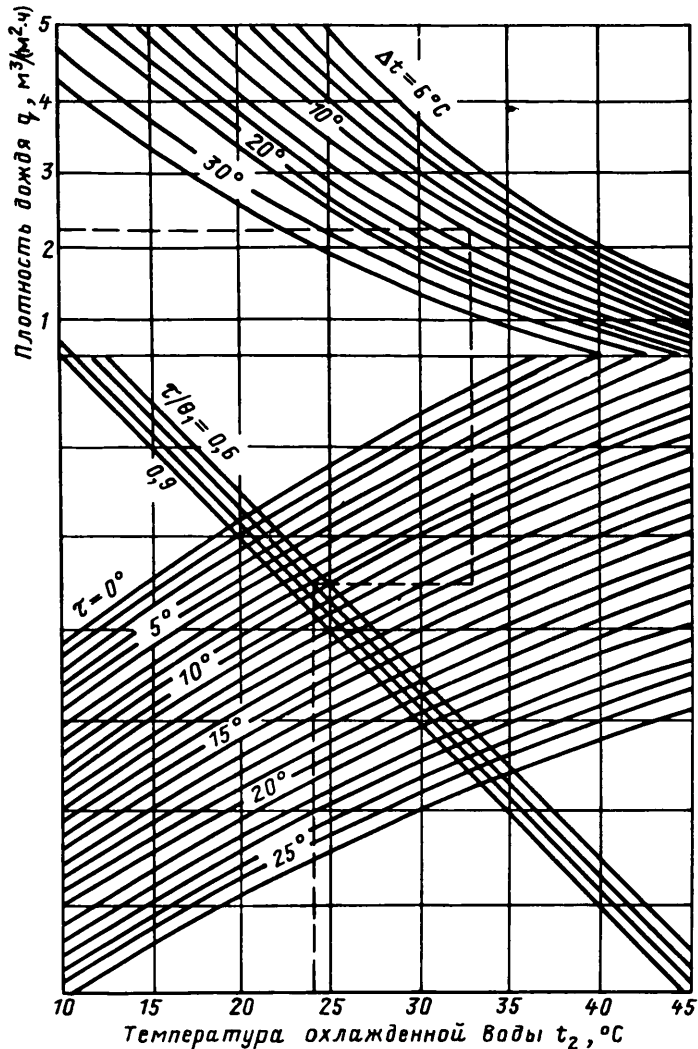


Рис. 7.2. Номограмма ВТИ для расчета башенных капельных градирен

Кратность охлаждения конденсатора

$$m = \frac{h_k - h'_k}{\Delta t_b c_p} = \frac{2180 - 134}{(28 - 18) \cdot 4,19} = 48,8.$$

Расход пара в конденсатор

$$D_k = W_{o.b.}/m = 15,0/48,8 = 0,307 \text{ м}^3/\text{с} = 307,0 \text{ кг/с}.$$

Конденсационная мощность электростанции

$$N_3^{\text{конд}} = D_{\kappa} H_0 \eta_{oi} \eta_{эм} = 307,0 \cdot 1468 \cdot 0,85 \cdot 0,96 = 367751,6 \text{ кВт} = 367,75 \text{ МВт.}$$

Задача 7.25. Определить расход добавочной воды для подпитки оборотной системы технического водоснабжения ТЭЦ с градирнями.

Установленная мощность ТЭЦ $N_3 = 150$ МВт. Начальные параметры пара на ТЭЦ: $p_0 = 13,0$ МПа; $t_0 = 560^\circ \text{C}$; давление в конденсаторе $p_{\kappa} = 5$ кПа. Давление в отборах турбин $p_t = 0,2$ МПа. Суммарный отпуск теплоты из отборов турбин $Q_t = 75$ МВт. Расход пара на регенеративный подогрев питательной воды $D_{\text{рег}}$ составляет 15% расхода пара на турбину. Средний относительный внутренний КПД турбин $\eta_{oi} = 0,8$; $\eta_{эм} = 0,96$. Кратность охлаждения конденсатора $m = 60$; продувка градирни $\alpha_{\text{прод}} = 0,2\% W_{o.в.}$; капельный унос воды в градирне $\alpha_{\gamma} = 0,1\% W_{o.в.}$. Охлаждение циркуляционной воды на 80% осуществляется за счет ее испарения.

Решение. По исходным данным с помощью h, s -диаграммы водяного пара определяются $h_0 = 3496$ кДж/кг; $h_{\kappa t} = 2024$ кДж/кг; $H_0 = 1472$ кДж/кг; $h_{\kappa} = 2320$ кДж/кг; $h_t = 2760$ кДж/кг; $y_{отб} = 0,37$.

Отпуск пара из отборов турбин

$$D_{отб} = \frac{Q_t}{h_{отб} - h'_{отб}} = \frac{75000}{2760 - 120 \cdot 4,19} = 33,33 \text{ кг/с} \approx 120 \text{ т/ч.}$$

Расход пара на турбину

$$D_t = 1,15 \left(\frac{N_3}{H_0 \eta_{oi} \eta_{эм}} + y_{отб} D_{отб} \right) = \left(\frac{150 \cdot 10^3}{1472 \cdot 0,8 \cdot 0,96} + 0,37 \cdot 120 \cdot 10^3 \right) \cdot 1,15 = \\ = (133 + 44,4) \cdot 1,15 = 204 \text{ кг/с} = 734,4 \text{ т/ч.}$$

Конденсационный поток пара

$$D_{\kappa} = D_t - D_{отб} - D_{\text{рег}} = 734,4 - 120 - 0,15 \cdot 734,4 = 504,2 \text{ т/ч.}$$

В условиях установившегося режима и при примерно равном парциальном давлении водяных паров в конденсаторе и в градирне $D_{\kappa} r_{\text{конд}} \approx r_{\text{исп}} W_{\text{исп}}$; $W_{\text{исп}} \approx 0,8 D_{\kappa} = 403$ т/ч.

Расход циркуляционной (охлаждающей) воды

$$W_{o.в.} = m D_{\kappa} = 60 \cdot 504,2 = 30252 \text{ т/ч.}$$

Расход добавочной воды на подпитку циркуляционной системы

$$W_{\text{доб}} = W_{\text{исп}} + W_{\text{прод}} + W_{\gamma} = \\ = 403 + 0,002 \cdot 30252 + 0,001 \cdot 30252 = 493,7 = 494 \text{ т/ч.}$$

Задача 7.26. Для условий задачи 7.25 определить разовую дозу хлора, вносимую в циркуляционную воду и его часовой расход для борьбы с развитием микроорганизмов в весенне-летний период. Хлоропоглощательная способность добавочной воды $\Pi = 1,4$ мг/л.

Решение. Доза вводимого хлора определяется по формуле

$$D_{\text{хл}} = \Pi K_{\gamma} + 2, \text{ мг/л}$$

где $k_{\gamma} = \frac{P_1 + P_2 + P_3}{P_2 + P_3}$ — коэффициент упаривания; P_1, P_2, P_3 — потери воды (процент расхода циркулирующей воды) на испарение, капельный унос и продувку:

$$P_1 = \frac{W_{\text{исп}}}{W_{\text{о.в}}} = \frac{403}{30\,252} \cdot 100 = 1,33\%;$$

$$P_2 = \frac{W_y}{W_{\text{о.в}}} = \frac{30,2}{30\,252} \cdot 100 = 0,1\%;$$

$$P_3 = \frac{W_{\text{прод}}}{W_{\text{о.в}}} = \frac{60,5}{30\,252} \cdot 100 = 0,2\%;$$

$$k_y = \frac{1,33 + 0,1 + 0,2}{0,1 + 0,2} = 5,43;$$

$$D_{\text{хл}} = 1,4 \cdot 5,43 + 2 = 9,6 \text{ мг/л.}$$

Обработка воды ведется продолжительностью 1 ч с периодичностью 3—4 раза в месяц.

Часовой расход хлора

$$G_{\text{хл}} = D_{\text{хл}} W_{\text{доб}} = 9,6 \cdot 10^{-6} \cdot 494 \cdot 10^3 = 4,74 \text{ кг/ч.}$$

Задача 7.27. Рассчитать золоуловительную установку с циклонами НИИОГАЗа типа ЦН-15. Расход дымовых газов $Q_v = 20 \text{ м}^3/\text{с}$; плотность газов при рабочей температуре $\rho_g = 0,785 \text{ кг/м}^3$. Концентрация летучей золы $c_{\text{вх}} = 20 \text{ мг/м}^3$; дисперсный состав золы: средний (медианный) размер частиц $d_m = 15 \text{ мкм}$; степень полидисперсности $\lg \sigma_g = 0,334$ (для каменных углей при барабанной сушке). Плотность частиц золы $\rho_z = 2000 \text{ кг/м}^3$, динамическая вязкость газов при рабочей температуре $\mu = 20,0 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}$.

Решение. Определяем оптимальную скорость газа $w_{\text{опт}}$ по данным, приведенным ниже [9]:

Тип циклона	ЦН-11	ЦН-15	ЦН-15У	ЦН-24	СК-ЦН-34	СК-ЦН-34М
$w_{\text{опт}}$, м/с	3,5	3,5	3,5	4,5	1,7	2,0

Для циклона ЦН-15 $w_{\text{опт}} = 3,5 \text{ м/с}$.

Внутренний диаметр циклона

$$D = \sqrt{4Q_v / (\pi w_{\text{опт}})} = \sqrt{20 \cdot 4 / (3,14 \cdot 3,5)} = 2,69 \text{ м.}$$

В СССР для циклонов принят следующий ряд внутренних диаметров D , мм: 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000, 1200, 1400, 1600, 1800, 2000, 2400 и 3000.

Устанавливаем параллельно два циклона ($n=2$) диаметром $D=2000 \text{ мм}$. Действительная скорость газа в циклоне

$$w = 4Q_v / (\pi n D^2) = 4 \cdot 20 / (3,14 \cdot 2 \cdot 2^2) = 3,18 \text{ м/с.}$$

Действительная скорость в циклоне не должна отклоняться от оптимальной более чем на 15%:

$$\Delta w = \frac{w_{\text{опт}} - w}{w_{\text{опт}}} \cdot 100 = \frac{3,5 - 3,18}{3,5} \cdot 100 = 9\%.$$

Геометрические размеры циклона определяются по данным приложения 1.

Высота цилиндрической части циклона

$$H_{\text{ц}} = D \cdot 2,26 = 2 \cdot 2,26 = 4,52 \text{ м.}$$

Высота конической части

$$H_k = D \cdot 2 = 2 \cdot 2 = 4 \text{ м.}$$

Высота выхлопной трубы

$$H_r = D \cdot 1,74 = 2 \cdot 1,74 = 3,48 \text{ м.}$$

Внутренний диаметр выхлопной трубы

$$d = D \cdot 0,3 = 2 \cdot 0,3 = 0,6 \text{ м.}$$

Диаметр бункера

$$D_6 = D \cdot 1,5 = 2 \cdot 1,5 = 3 \text{ м.}$$

Высота цилиндрической части бункера

$$H_{ч.6} = D \cdot 0,8 = 2 \cdot 0,8 = 1,6 \text{ м.}$$

Коэффициент гидравлического сопротивления одиночного циклона

$$\xi = k_1 k_2 \xi_{500},$$

где k_1 и k_2 — поправочные коэффициенты, принимаемые по приложениям 2 и 3; ξ_{500} — коэффициент гидравлического сопротивления для циклона диаметром 500 мм (берется из приложения 4).

При выхлопе в гидравлическую сеть

$$\xi = 1 \cdot 0,92 \cdot 155 = 142,6.$$

Гидравлическое сопротивление циклона

$$\Delta p = p_{вх} - p_{вых} = \xi \rho_{ч} w^2 / 2 = 142,6 \cdot 0,785 (3,18^2 / 2) = 566 \text{ Па.}$$

Эффективность очистки газа (КПД циклона) $\eta_{гг} = 0,5 [1 + \Phi(x)]$, где $\Phi(x)$ — табличная функция от параметра x (см. приложение 6): $x = \lg(d_m/d_{50}) / \sqrt{\lg^2 \sigma_\eta + \lg^2 \sigma_\chi}$; здесь d_{50} — средний (медианный) размер частиц для типового циклона, мкм, и параметр $\lg \sigma_\eta$ см. в приложении 5.

Значения d_{50}^r определены для условий работы типового циклона: $D_r = 0,6$ м; $\rho_{ч,r} = 1930$ кг/м³; $\mu_r = 22,2 \cdot 10^{-6}$ Па·с; $w_r = 3,5$ м/с.

Для учета влияния отклонений и условий работы от типовых на величину d_{50} используется зависимость

$$d_{50} = d_{50}^r \sqrt{D/D_r (\rho_{ч,r}/\rho_r) (\mu/\mu_r) (w_r/w)};$$

$$d_{50} = 4,5 \sqrt{(2000/600)(1930/2000)(20,9 \cdot 10^{-6}/22,2 \cdot 10^{-6})(3,5/3,18)} = 8,215.$$

$$x = \frac{\lg(15,0/8,215)}{\sqrt{(0,352)^2 + (0,334)^2}} = \frac{\lg 1,826}{\sqrt{0,235}} = \frac{0,261}{0,485} = 0,538; \Phi(x) = 0,703.$$

КПД циклона $\eta_{гг} = 0,5 (1 + 0,703) = 0,851$.

Если требуется обеспечить наперед заданную степень очистки, то расчет циклона осуществляется методом последовательных приближений с учетом выражений

$$\left(\frac{1 - \eta_1}{1 - \eta_2} \right)^2 = \frac{\xi_2}{\xi_1} \frac{w_2}{w_1} \frac{D_1}{D_2}.$$

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Геометрические размеры циклонов [9]

Геометрические размеры в долях	Тип циклона			
	ЦН-11	ЦН-15	ЦН-15У	ЦН-24
Высота цилиндрической части $H_{ц}$	2,06	2,26	1,51	2,11
Высота конической части H_k	2,0	2,0	1,50	1,75
Высота выхлопной трубы H_r	1,56	1,74	1,5	2,11
Высота внешней части выхлопной трубы $H_в$	0,3	0,3	0,3	0,4
Внутренний диаметр выхлопной трубы $d_{\text{выкл}}$	0,59	0,59	0,59	0,59
Диаметр бункера D_6	1,5	1,5	1,5	1,5
Высота цилиндрической части бункера $H_{ц.6}$	0,8	0,8	0,8	0,8
Угол наклона днища бункера α , град	60	60	60	60

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Значения k_1 для циклонов [9]

Тип циклона	Значение k_1 для D , мм			
	200	300	400	500
ЦН-11	0,95	0,96	0,99	1,0
ЦН-15, ЦН-15У, ЦН-24	0,90	0,93	1,0	1,0

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Значения k_2 для циклонов [9]

Тип циклона	Значение k_2 при $c_{\text{вх}}$, г/м ³						
	0	10	20	40	80	120	150
ЦН-11	1	0,96	0,94	0,92	0,9	0,87	0,5
ЦН-15	1	0,93	0,92	0,91	0,9	0,87	0,86
ЦН-15У	1	0,93	0,92	0,91	0,89	0,88	0,87
ЦН-24	1	0,95	0,93	0,92	0,9	0,87	0,86

Значение ξ_{500} для циклонов [9]

Тип циклона	Значение ξ_{500}	
	при выхлопе в атмосферу	при выхлопе в гидравлическую сеть
ЦН-11	250	245
ЦН-15	163	155
ЦН-15У	170	165
ЦН-24	80	75

ПРИЛОЖЕНИЕ 5

Значения d'_{50} и $\lg \sigma_\eta$ для циклонов [9]

Тип циклона	ЦН-11	ЦН-15	ЦН-15У	ЦН-24	СК-ЦН-34
d'_{50} , мкм	3,65	4,5	6,0	8,5	1,95
$\lg \sigma_\eta$	0,352	0,352	0,283	0,308	0,308

ПРИЛОЖЕНИЕ 6

Значение параметра $\Phi(x)$ [9]

x	-1	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	2,0
Φ	0,158	0,50	0,579	0,655	0,726	0,788	0,841	0,885	0,919	0,945	0,977

ПРИЛОЖЕНИЕ 7

Значение величины A_i для некоторых веществ, выбрасываемых в атмосферу* [4]

Вещество	A_i , усл. т/т	Вещество	A_i , усл. т/т
Оксид углерода CO	1	Сажа без примесей	41,5
Диоксид серы SO ₂	16,5	(пыль углерода без учета примесей)	
Сероводород H ₂ S	41,1	Оксида натрия, магния, калия, кальция, железа, стронция, молибдена, вольфрама, висмута	13,9
Серная кислота H ₂ SO ₄	49,0		
Оксид азота в пересчете на NO ₂ (по массе)	41,1		
Аммиак NH ₃	4,64		
Летучие низкомолекулярные углеводороды (для жидких топлив—бензинов и др. по углероду)	1,26	Древесная пыль	19,6
Ацетон CH ₃ COCH ₃	2,22	Пентаоксид диванадия (пыль) V ₂ O ₅	1225
Фенол C ₆ H ₅ OH	170	Неорганические соединения шестивалентного хрома	10

Вещество	A_i , усл. т/т	Вещество	A_i , усл. т/т
Цианистый водород HCN	262	(по CrO_3)	
Хлор молекулярный	89,4	Никель и его окислы	5475
Оксиды алюминия Al_2O_3	16,9	Кобальт металлический, оксид кобальта	1730
Диоксид кремния SiO_2	83,2	Оксид цинка ZnO	245
		Оксиды мышьяка	1581
		Неорганические соединения ртути по Hg	22 400
		Неорганические соединения свинца по Pb	22 400

* Указанные в таблице значения A_i соответствуют случаю выброса примесей в зонах с количеством осадков свыше 400 мм в год. В более засушливых зонах эти значения следует увеличить в 1,2 раза для всех твердых аэрозолей.

ПРИЛОЖЕНИЕ 8

Значение величины A_i для неорганической пыли [4]

Вид пыли	A_i , усл. т/т	Вид пыли	A_i , усл. т/т
Золы углей: донецких (АШ, Д, ТСШ), подмосковных	70	Твердые частицы, выбрасываемые транспортными средствами с двигателями внутреннего сгорания, работающими на неэтилированном бензине	300
кузнецких, экибастузских, карагандинских, березовских, назаровских, ангренских	80	То же на этилированном бензине	500
Золы торфов (в среднем)	60	То же для дизелей, топливных и иных установок, сжигающих мазуты и газ	200
Коксовая и агломерационная пыль, выбрасываемая предприятиями черной металлургии (в среднем)	100	Пыли цементных производств (в среднем)	45
Каменноугольная пыль	40	Пыль слюды	70
Пыль никелевого агломерата	600	Пыль талька	35
		Пыль гипса, известняка	25

ПРИЛОЖЕНИЕ 9

Значение величины σ [4]

Тип загрязняемой территории	σ
Территории курортов, санаториев, заповедников	10
Территории пригородных зон отдыха и садовых кооперативов	8
Территории промышленных предприятий	4
Леса (1-й — 3-й групп)	0,2—0,025

Тип загрязняемой территории	σ
Пашни *	0,1—0,25
Сады, виноградники *	0,5
Территории населенных мест с плотностью населения n , чел/га	$0,1 \frac{\text{га}}{\text{чел}} n$

* Для орошаемых земель указанные в табл. 9 числа следует умножить на 2.

ПРИЛОЖЕНИЕ 10

Значения σ_k для различных водохозяйственных участков [4]

Наименование бассейнов рек и створов	Административный состав участка	σ_k
Печора (устье)	Коми АССР (без юго-западной части), Ненецкий национальный округ (южный район)	0,16
Сев. Двина (устье)	Коми АССР (юго-западная часть), Во- логодская обл.	0,22
Нева (устье)	Карельская АССР, Ленинградская, Псковская обл. (восточная часть)	0,47
Даугава	ЛатвССР (центральная часть), Витеб- ская, Калининская и Смоленская обл.	0,50
Днестр (устье)	Львовская обл. (южная часть), Хмель- ницкая обл., МССР (без юго-западной части), Тернопольская обл.	1,84
Днепр (Киев)	Смоленская, Брянская, Курская обл.	1,75
Каховский гидроузел	Киевская обл. (юго-восточная часть), Черкасская, Полтавская, Сумская и Днепропетровская обл.	2,33
Днепр (устье)	Херсонская обл., Днепропетровская обл. (западная часть), Кировоградская обл. (восточная часть)	0,99
Дон (устье р. Воронеж)	Тамбовская обл. (западная часть), До- нецкая обл. (восточная часть), Воронеж- ская обл.	1,63
Сев. Донец (устье)		3,78
Дон (устье)	Ростовская обл. (центральная и восточ- ная части), Калмыцкая АССР (западная часть)	3,50
Цимлянский гидроузел	Тульская обл. (юго-восточная часть), Орловская обл. (восточная часть), Кур- ская обл. (восточная часть)	1,13
Волга (устье р. Оки)		2,60
Волга (ниже г. Горького)	Горьковская обл. (центральная часть), Марийская АССР (юго-западная часть), Чувашская АССР (северная часть)	0,91
Волга (Куйбышев)		0,70
Волга	Татарская АССР	0,50
Волга (устье)		0,80
Кубань (Невинномысск)	Краснодарский край (южная часть)	2,73
Терек (устье)		2,01
Кура (Мингечаур)		2,37
Кура (устье)	АзССР (без северо-западной части), АрмССР (северная часть)	2,13
Урал (Уральск)		2,70

Наименование бассейнов рек и створов	Административный состав участка	σ_k
Урал (устье)		0,75
Сырдарья (Чардара)		0,82
Сырдарья (устье)		0,37
Амударья		0,41
Обь (устье р. Томи), Томь	Новосибирская обл. (восточная часть), Кемеровская обл. (западная часть), Томская обл. (южная часть)	0,70
Обь (бассейн р. Чулым)	Красноярский край (юго-западная часть), Кемеровская обл., Томская обл. (восточная часть), Новосибирская обл. (северо-восточная часть)	0,70
Обь (Новосибирск)	Алтайский край, Новосибирская обл. (юго-восточная часть)	0,34
Обь (устье)		0,12
Иртыш (Павлодар)		2,10
Иртыш (устье)	Тюменская обл. (северо-восточная часть), Ханты-Мансийский автономный округ (южная часть)	1,00
Ишим (устье)	Тюменская обл. (восточная часть)	0,81
Тобол (устье)	Тюменская обл. (юго-западная часть)	0,97
Енисей (Красноярск)	Красноярский край (южная и юго-восточная часть)	0,19
Енисей (устье)		0,11
Селенга (устье)		0,26
Другие реки Забайкалья	Бурятская АССР (северо-западная часть)	0,21
Лена (Якутск)		0,15
Лена (устье)		0,14
Амур (устье)	Хабаровский край (южная и юго-восточная часть)	0,19
Онежское озеро		0,20

ПРИЛОЖЕНИЕ 11

Значения ПДК и константы A_i для некоторых распространенных веществ, загрязняющих водоемы [4]

Вещество	ПДК _{р/х} , г/м ³	ПДК _{с/б} , г/м ³	A_i
БПК _{полн}	3,0	—	0,33
Взвешенные вещества	20,0	—	0,05
Сульфаты	—	500	0,002
Хлориды	—	350	0,003
Азот общий	—	10	0,1
СПАВ	0,5	—	2,0
Нефть и нефтепродукты	0,05	—	20
Медь	0,01	—	100
Цинк	0,01	—	100
Аммиак	0,05	—	20
Мышьяк	0,05	—	20
Цианиды	0,05	—	20
Формальдегид	0,1	—	10

Теплофикационные турбины (технические данные) [15]

Тип турбины	Завод — изготовитель	Мощность ном./макс., МВт	Параметры пара		Расход пара на турбину, т/ч	Число отборов	Температура питательной воды, °С	Промышленный отбор		Теплофикационный отбор	
			t , °С	p , МПа				Давление, МПа	Расход, т/ч	Давление, МПа	Расход, т/ч
Т-250/300-240	ТМЗ	250/300	540/540	23,54	980	9	263	—	—	0,059—0,196 0,049—0,147 0,059—0,294	600 480
Т-175/210-130	»	175/210	555	12,75	760	7	232	—	—	0,045—0,196 0,059—0,245	320
Т-100/120-130	»	100/120	555	12,75	485	7	232	—	—	0,045—0,196 0,059—0,245	160
Т-50/60-130	»	50/60	555	12,75	255	7	225	—	—	0,049—0,196 0,089—0,245	255
ПТ-135/165-130/15	»	135/165	555	12,75	760	7	230	1,18—2,16	390	0,039—0,118 0,098—0,034 0,118	200 160
ПТ-80/100-130/13	ЛМЗ	80/100	565	12,75	470	7	249	1,28	300	0,059—0,245	110
ПТ-60/75-130/13	»	60/75	565	12,75	387	7	242	1,28	250	0,049—0,196 0,118	160
ПТ-50/60-130/7	ТМЗ	50/60	555	12,75	300	7	230	0,49—0,98	160	0,049—0,196 0,118	160
ПТ-60/75-90/13	ЛМЗ	60/75	535	8,82	402	7	232	1,28	250	—	—
Р-50-130/13	»	50/60	565	12,75	480	3	235	—	—	—	—
Р-100-130/15	ТМЗ	100/107	555	12,75	760	1	—	—	—	—	—
П-6-35/5	КТЗ	6/6	435	3,43	55,8	2	150	0,49	40	—	—

Термодинамические свойства воды и водяного пара на линии насыщения (по температуре) [11]

$t, ^\circ\text{C}$	p, kPa	$r, \text{кДж/кг}$	v		h		s	
			пар, $\text{м}^3/\text{кг}$	вода, $10^3 \text{ м}^3/\text{кг}$	пар, кДж/кг	вода, кДж/кг	пар, $\text{кДж/(кг} \cdot \text{K)}$	вода, $\text{кДж/(кг} \cdot \text{K)}$
0	0,61	2501	206,3	1,0002	2501	-0,04	9,156	0,0002
10	1,227	2477	106,4	1,0003	2519	42,0	8,901	0,1510
20	2,337	2454	57,83	1,0017	2538	83,9	8,667	0,2963
30	4,242	2430	32,93	1,0043	2556	125,7	8,454	0,4365
40	7,375	2406	19,55	1,0078	2574	167,45	8,258	0,5721
50	12,335	2383	12,05	1,0121	2592	209,26	8,077	0,7035
60	19,919	2358	7,68	1,0171	2609	251,09	7,911	0,8310
70	31,161	2334	5,048	1,0228	2627	292,97	7,757	0,9548
80	47,359	2309	3,410	1,0292	2644	334,92	7,614	1,0752
90	70,108	2283	2,362	1,0361	2660	376,94	7,481	1,1925
100	101,325	2257	1,674	1,0437	2676	419,06	7,356	1,3069
105	120,80	2244	1,420	1,0477	2684	440,17	7,297	1,3630
110	143,26	2230	1,211	1,0519	2692	461,32	7,240	1,4185
115	169,05	2217	1,037	1,0562	2699	482,50	7,185	1,4733
120	198,54	2203	0,892	1,0606	2707	503,70	7,131	1,5276
125	232,09	2189	0,771	1,0652	2714	525,0	7,079	1,5813
130	270,12	2174	0,668	1,0700	2721	546,3	7,028	1,6344
135	313,06	2160	0,582	1,0750	2727	567,7	6,979	1,6869
140	361,36	2145	0,509	1,0801	2734	589,1	6,931	1,7390
145	415,50	2130	0,446	1,0853	2740	610,6	6,834	1,790

$t, ^\circ\text{C}$	$p, \text{кПа}$	$r, \text{кДж/кг}$	v		h		s	
			пар, $\text{м}^3/\text{кг}$	вода, $10^3 \text{ м}^3/\text{кг}$	пар, кДж/кг	вода, кДж/кг	пар, $\text{кДж/(кг} \cdot \text{K)}$	вода, $\text{кДж/(кг} \cdot \text{K)}$
150	475,97	2114	0,393	1,0908	2746	632,2	6,838	1,8416
155	543,31	2098	0,347	1,0964	2753	653,8	6,793	1,8923
160	618,04	2082	0,307	1,1022	2758	675,5	6,750	1,9425
165	700,75	2066	0,272	1,1082	2763	697,3	6,707	1,9922
170	792,02	2049	0,243	1,1145	2768	719,1	6,665	2,0416
175	892,46	2032	0,217	1,1209	2773	741,1	6,624	2,0906
180	1002,7	2014	0,194	1,1275	2777	763,1	6,584	2,1393
185	1123,4	1996	0,174	1,1344	2781	785,3	6,544	2,1876
190	1255,2	1977	0,156	1,1415	2785	807,5	6,505	2,2356
195	1398,9	1958	0,141	1,1489	2788	829,0	6,467	2,2833
200	1555,1	1939	0,127	1,1565	2791	852,4	6,429	2,3307
210	1907,9	1899	0,104	1,1726	2796	897,8	6,355	2,4267
220	2320,1	1856	0,086	1,1900	2800	943,7	6,282	2,5178
230	2797,9	1811	0,071	1,2087	2802	990,3	6,210	2,6102
240	3348,0	1764	0,059	1,2291	2802	1037,6	6,140	2,7021
250	3977,6	1714	0,050	1,2513	2799	1085,8	6,069	2,7936
260	4694,0	1660	0,042	1,2756	2795	1135,0	5,999	2,8850
270	5505,1	1603	0,0356	1,3025	2788	1185,4	5,928	2,9766
280	6419,1	1542	0,0301	1,3324	2779	1237,0	5,856	3,0687
290	7444,8	1475	0,0255	1,3659	2765	1290,3	5,781	3,1616
300	8591,7	1403	0,0216	1,4041	2748	1345,4	5,704	3,2559
320	11 290	1236	0,0152	1,5051	2699	1463,4	5,536	3,4513
340	14 608	1025	0,0108	1,6390	2622	1596,8	5,336	3,6638
360	18 674	722,0	0,0070	1,8930	2486	1763,1	5,060	3,9189
374,12	22 115	0	0,00315	3,147	2095,2	2095,2	4,4237	4,4237

Изобарная теплоемкость, теплопроводность, динамическая вязкость, число Прандтля воды и водяного пара в состоянии насыщения [11]

$t, ^\circ\text{C}$	$c_p, \text{кДж/(кг} \cdot \text{К)}$		$\lambda \cdot 10^{-3}, \text{Вт/(м} \cdot \text{К)}$		$\mu \cdot 10^6, \text{Па} \cdot \text{с}$		Pr	
	жидкость	пар	жидкость	пар	жидкость	пар	жидкость	пар
0	4,217	1,864	561,0	17,1	1792	9,22	13,47	1,01
10	4,193	1,868	580,0	17,6	1308	9,46	9,46	1,00
20	4,182	1,874	598,5	18,2	1003	9,73	7,01	1,00
30	4,179	1,883	615,5	18,9	797,7	10,01	5,42	0,997
40	4,179	1,894	630,6	19,6	653,1	10,31	4,33	0,996
50	4,181	1,907	643,6	20,4	547,0	10,62	3,55	0,993
60	4,185	1,924	654,4	21,2	466,8	10,94	2,99	0,992
70	4,190	1,944	663,0	22,1	404,4	11,26	2,56	0,990
80	4,197	1,969	669,8	23,0	354,9	11,60	2,22	0,993
90	4,205	1,999	675,1	24,0	314,9	11,93	1,93	0,994
100	4,216	2,034	678,8	25,1	282,1	12,28	1,75	0,995
110	4,229	2,075	681,3	26,2	254,9	12,62	1,58	0,999
120	4,245	2,124	683,0	27,5	232,1	12,97	1,44	1,00
130	4,263	2,180	683,4	28,8	212,7	13,32	1,33	1,01
140	4,285	2,245	682,9	30,1	196,1	13,67	1,23	1,02
150	4,310	2,320	681,7	31,6	181,9	14,02	1,15	1,03
160	4,339	2,406	679,7	33,1	169,6	14,37	1,08	1,04
170	4,371	2,504	676,8	34,7	158,8	14,72	1,03	1,06
180	4,408	2,615	673,2	36,4	149,4	15,07	0,978	1,08
190	4,449	2,741	668,7	38,2	141,0	15,42	0,938	1,11
200	4,497	2,883	663,3	40,1	133,6	15,78	0,906	1,13
220	4,614	3,223	649,8	44,2	121,0	16,49	0,859	1,20
240	4,770	3,656	632,1	48,7	110,5	17,22	0,834	1,29
260	4,986	4,221	609,6	54,0	101,5	17,98	0,830	1,41
280	5,30	4,993	581,4	60,6	93,41	18,80	0,852	1,55
300	5,77	6,14	547,5	69,6	85,81	19,74	0,904	1,74
320	6,59	8,05	509,1	83,8	78,27	20,89	1,01	2,01
340	8,27	11,92	408,6	110,3	70,21	22,52	1,24	2,43
360	14,99	26,79	423,1	180,6	60,21	25,53	2,13	3,79
370	53,9	112,9	424	347	51,43	29,41	6,54	2,61
371	72,5	151,3	433	392	50,07	30,2	8,33	11,7
372	126,0	228,2	474	459	48,6	31,3	12,9	15,6
373	239,6	457,0	538	604	46,8	33,0	20,8	25,0
374	3087	6198	1225	1700	46,9	39,6	118	144

Значения $A(L_n)$ и $B(L_n)$ в зависимости от $L_{n(\text{д})\text{экв}}$

$L_{n(\text{д})\text{экв}}, \text{дБА}$	$A(L_n)$	$B(L_n)$	$L_{n(\text{д})\text{экв}}, \text{дБА}$	$A(L_n)$	$B(L_n)$
25	0,6	0,4	49	75,5	24,6
26	1,4	0,8	50	84,4	26,7
27	2,2	1,2	51	94,3	29,0
28	3,1	1,7	52	105,3	31,5
29	4,1	2,2	53	117,5	34,1
30	5,2	2,7	54	131,1	36,9
31	6,5	3,3	55	146,1	40,0
32	7,8	3,9	56	162,8	43,2

$L_{\text{ш}}(\text{д})_{\text{экв}}$, дБА	$A(L_{\text{ш}})$	$B(L_{\text{ш}})$	$L_{\text{ш}}(\text{д})_{\text{экв}}$, дБА	$A(L_{\text{ш}})$	$B(L_{\text{ш}})$
33	9,4	4,6	57	181,3	46,7
34	11,1	5,3	58	201,8	50,4
35	12,9	6,0	59	224,6	54,4
36	15,0	6,8	60	—	58,7
37	17,3	7,7	61	—	63,3
38	19,8	8,6	62	—	68,3
39	22,7	9,6	63	—	73,5
40	25,9	10,7	64	—	79,1
41	29,4	11,5	65	—	85,2
42	33,3	13,1	66	—	91,7
43	37,6	14,1	67	—	98,7
44	42,4	15,8	68	—	106,1
45	47,7	17,3	69	—	114,1
46	53,6	19,0			
47	60,2	20,7			
48	67,4	22,6			

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баженов М. И., Богородский А. С. Составление и расчет принципиальной тепловой схемы паротурбинной электростанции. М.: Изд-во МЭИ, 1984.
2. Бененсон Е. И., Иоффе Л. С. Теплофикационные паровые турбины. М.: Энергоатомиздат, 1986.
3. Бродянский В. М. Эксергетический метод термодинамического анализа. М.: Энергия, 1974.
4. Временная типовая методика определения экономической эффективности осуществления природоохранных мероприятий и оценки экономического ущерба, причиняемого народному хозяйству загрязнением окружающей среды. М.: Наука, 1983.
5. Голубков Б. Н. Двухцелевая теплоутилизационная установка для использования горячей воды на предприятиях. Тр. МЭИ. 1980. Вып. 480. С. 52—53.
6. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1975.
7. Лукницкий В. В. Тепловые электрические станции промышленных предприятий. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1953.
8. Малюшенко В. В., Михайлов А. К. Энергетические насосы. Справочное пособие. М.: Энергоиздат, 1981.
9. Охрана окружающей среды: Учеб. пособие для технич. спец. вузов/С. В. Белов, Ф. А. Барбинов, А. Ф. Козьяков и др./Под ред. С. В. Белова. М.: Высшая школа, 1983.
10. Промышленные тепловые электростанции: Учебник для вузов/М. И. Баженов, А. С. Богородский, Б. В. Сазанов, В. Н. Юренев/Под ред. Е. Я. Соколова. 2-е изд., перераб. М.: Энергия, 1979.
11. Ривкин С. Л., Александров А. А. Термодинамические свойства воды и водяного пара. Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1984.
12. Соколов Е. Я. Теплофикация и тепловые сети. 5-е изд. М.: Энергоиздат, 1982.
13. Соколов Е. Я., Зингер Н. М. Струйные аппараты. 2-е изд. М.: Энергия, 1970.
14. Соколов Е. Я., Мартынов А. В. Эксергетический метод расчета процессов преобразования теплоты в паротурбинном цикле//Изв. вузов. Сер. Энергетика. 1983. № 1. С. 67—70.