

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
Санкт-Петербургский горный университет

Кафедра теплотехники и теплоэнергетики

ТЕПЛОВЫЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

*Методические указания к практическим занятиям
для студентов бакалавриата направления 13.03.01*

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2020

УДК 519.86:622.3.012 (073)

ТЕПЛОВЫЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ: Методические указания к практическим занятиям / Санкт-Петербургский горный университет. Сост. *В.В. Андреев*. СПб, 2020. 31 с.

Методические указания предназначены для подготовки и выполнения студентами практических заданий. Содержат необходимые сведения и порядок выполнения типовых практических заданий, а также сами задания на практические занятия. Методическое пособие содержит рекомендации по выбору и составлению принципиальных тепловых схем электростанций; порядок расчета тепловых схем; определение показателей экономичности работы электростанции.

Предназначены для студентов бакалавриата направления 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»

Научный редактор проф. *В.А.Лебедев*

Рецензент д-р техн. наук *П.А. Кругликов*

ВВЕДЕНИЕ

Целью практических занятий является закрепление теоретических знаний, полученных студентом при изучении курса, и использовании этих знаний при решении практических задач на производстве.

Задачей практических занятий является ознакомление студентом с частными вопросами разного характера для изучения тепловых схем электростанций и теплового расчета их элементов.

При выполнении всех задач на практических занятиях перед тем, как приступить к решению поставленной задачи, необходимо составить принципиальную тепловую схему энергоблока или электростанции. Степень детализации ПТС определяется условиями задачи и должна им полностью соответствовать. В узловых точках ПТС должны быть указаны (в условных обозначениях) параметры и расходы воды и пара.

Следует построить $h-s$ – диаграмму процесса расширения пара в турбине, если это необходимо для решения задачи. На диаграмме должны быть показаны как реальные (действительные), так и идеальные (адиабатические) процессы расширения. Все характерные точки процесса расширения должны быть обозначены с указанием их необходимых для расчетов параметров.

Должен быть приведен перечень всех необходимых для расчетов параметров с указанием обозначения и размерности. Численные значения параметров должны иметь три значащие цифры и определяться по таблицам теплофизических свойств воды и водяного пара с применением при необходимости линейной интерполяции.

Практическое занятие 1. Расчет энергетических показателей

Для конденсационного энергетического блока по данным, приведенным в табл. 1.1, определить:

1. Термический КПД энергоблока η_t .
2. Транспортный КПД η_t .
3. Внутренний относительный КПД турбины η_{oi} .
4. Внутренний абсолютный КПД турбины η_i .
5. Абсолютный электрический КПД турбоустановки $\eta_{оэ}$.
6. Абсолютный электрический КПД энергоблока η_c .
7. Удельный расход теплоты на турбоустановку $q_{ту}$.
8. Удельный расход теплоты на станции q_c .
9. Удельный расход условного топлива b_y .

Необходимые для расчета дополнительные величины принять по данным учебных пособий или справочной литературе, рекомендуемой в рабочей программе.

Методические указания по выполнению практического занятия 1.

Термический КПД η_t для цикла с промперегревом пара определяется по формуле

$$\eta_t = \frac{H_a^{ЦВД} + \alpha_{пп} H_a^{ЦНД}}{q_{пв} + q_{пп,t}}, \quad (1.1)$$

где $H_a^{ЦВД} = h_0 - h'_{пп,t}$ – адиабатический теплоперепад в ЦВД, кДж/кг;

$H_a^{ЦНД} = h''_{пп} - h_{k,t}$ – адиабатический теплоперепад в ЦНД, кДж/кг;

$\alpha_{пп} = \frac{D_{пп}}{D_0}$ – доля расхода пара на промперегрев;

$q_{пв} = h'_0 - h_{пв}$ – удельное количество теплоты, подведенное в котле, кДж/кг;

$q_{пп,t} = \alpha_{пп} (h''_{пп} - h'_{пп,t})$ – удельное теоретическое количество теплоты, подведенной к пару в промперегревателе, кДж/кг.

Таблица 1.1

Условия и показатели	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Электрическая мощность блока N_3 , МВт	210	160	200	310	300	505	810	1200	300	500
Параметры пара за котлом: - давление p'_0 , МПа; - температура t'_0 , °С	14,0 545	14,0 545	14,0 545	25,5 545	25,5 545	25,5 565	25,5 565	25,5 565	25,5 545	25,5 545
Параметры пара перед турбиной: - давление p_0 , МПа; - температура t_0 , °С	13,0 535	13,0 540	13,0 540	24,0 540	24,0 540	24,0 560	24,0 560	24,0 560	24,0 540	24,0 540
Расход свежего пара D_0 , т/ч	565	436	560	890	865	1500	2400	3600	910	1540
Промежуточный перегрев пара (расход в % от свежего), $\frac{D_{пп}}{D_0} 100$, %	88	90	88	82	83	84	82	83	84	84
Параметры до промпрегрева: - давление $p'_{пп}$, МПа; - температура $t'_{пп}$, °С	2,40 346	3,25 371	2,33 345	4,0 300	4,2 305	4,6 310	3,8 300	3,9 300	4,0 300	4,6 310
Давление воды за питательным насосом $p_{пн}$, МПа	20,0	18,0	18,0	34,0	34,0	35,0	35,0	35,0	34,0	35,0

Окончание таблицы 1.1

Условия и показатели	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Параметры после промперегрева: - давление $p''_{пп}$, МПа; - температура, $t''_{пп}$, °С	2,10	2,85	2,05	3,6	3,8	4,2	3,4	3,5	3,6	4,2
Параметры отработавшего пара: - давление p_k , кПа; - энтальпия, h_k , кДж/кг	545	545	545	545	545	545	545	545	545	545
Температура питательной воды: - за последним подогревателем высокого давления $t'_{пв}$, °С - перед котлом $t_{пв}$, °С	4,0	3,5	3,5	3,8	3,5	3,5	4,0	3,5	4,0	5,0
Потери рабочей среды в цикле (в % от расхода пара на турбину), $\beta_n \cdot 100$, %	2450	2430	2440	2420	2410	2400	2420	2400	2420	2440
КПД котла, нетто $\eta_{ка}$, %	232	228	230	265	268	262	260	278	262	240
Электромеханический КПД генератора $\eta_{эм}$, %	230	226	228	263	266	260	258	276	260	238
	2,5	2,0	2,6	2,5	2,2	2,0	2,4	2,3	2,1	2,0
	87	88	90	89	91	89	88	87	90	91
	96	95	97	95	96	94	97	95	94	96

В формуле (1.1) энтальпия h_0 определяется по параметрам пара перед турбиной; $h_{пв}$ – по параметрам воды перед котлом; $h''_{пп}$ – по

параметрам пара после промперегрева; $h'_{пп,t}$ и $h_{k,t}$ – по параметрам, соответствующим окончанию процесса адиабатического расширения пара в ЦВД и ЦНД турбины соответственно. Пример расширения пара в турбине с промежуточным перегревом показан на рис. 1.1.

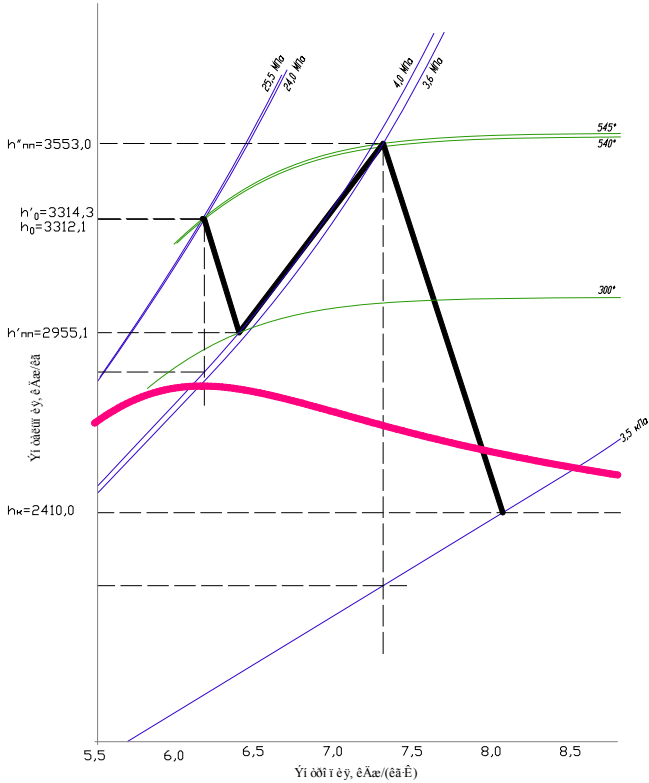


Рис. 1.1. Расширение пара в турбине с промежуточным перегревом

Внутренний относительный КПД турбины

$$\eta_{oi} = \frac{H_i^{ЦВД} + \alpha_{пп} H_i^{ЦНД}}{H_a^{ЦВД} + \alpha_{пп} H_a^{ЦНД}}, \quad (1.2)$$

где $H_i^{ЦВД} = h_0 - h'_{пп}$ – действительный теплоперепад в ЦВД, кДж/кг;

$H_i^{\text{ЦНД}} = h''_{\text{пп}} - h_k$ – действительный теплоперепад в ЦНД, кДж/кг.

В формуле (1.2) энтальпия $h'_{\text{пп}}$ определяется по параметрам пара перед промперегревателем, а h_k – по табл. 1.1.

Транспортный КПД

$$\eta_{\text{тр}} = \frac{Q_{\text{ту}}}{Q_{\text{ка}}}, \quad (1.3)$$

где $Q_{\text{ту}} = D_0 \cdot 10^3 [(h_0 - h''_{\text{пп}}) + \alpha_{\text{пп}}(h''_{\text{пп}} - h_k) + (h_k - h'_{\text{пв}})]$ – расход тепла на турбоустановку, кДж/ч;

$Q_{\text{ка}} = D_0 \cdot 10^3 [(1 + \beta_{\text{п}})(h'_0 - h_{\text{пв}}) + \alpha_{\text{пп}}(h''_{\text{пп}} - h'_{\text{пп}})]$ – тепловая нагрузка котла, кДж/ч.

В формуле (1.3) энтальпия h'_0 определяется по параметрам пара за котлом, $h_{\text{пв}}$ – по параметрам воды перед котлом, а $h'_{\text{пв}}$ – по параметрам воды за последним регенеративным подогревателем.

Расчет КПД η_i , $\eta_{\text{оэ}}$ и $\eta_{\text{с}}$ выполняется по формулам

$$\eta_i = \eta_{\text{oi}} \cdot \eta_i; \quad (1.4)$$

$$\eta_{\text{оэ}} = \eta_{\text{oi}} \cdot \eta_{\text{эм}}; \quad (1.5)$$

$$\eta_{\text{с}} = \eta_{\text{ка}} \cdot \eta_{\text{тр}} \cdot \eta_i \cdot \eta_{\text{oi}} \cdot \eta_{\text{эм}}. \quad (1.6)$$

Удельный расход теплоты на турбоустановку, кДж/(кВт·ч)

$$q_{\text{ту}} = \frac{Q_{\text{ту}}}{N_3}, \quad (1.7)$$

удельный расход теплоты на станции, кДж/(кВт·ч)

$$q_{\text{с}} = \frac{Q_{\text{ту}}}{\eta_{\text{ка}} N_3}. \quad (1.8)$$

Удельный расход условного топлива на выработку 1 кВт·ч электроэнергии, кг/(кВт·ч)

$$b_{\text{у}} = \frac{0,123}{\eta_{\text{с}}}. \quad (1.9)$$

Практическое занятие 2

Сопоставление комбинированной и раздельной выработок тепловой и электрической энергии

По данным, приведенным в табл. 2.1, определить экономию топлива при комбинированной выработке на ТЭЦ электроэнергии и тепла по сравнению с раздельной выработкой тех же количеств электрической (на КЭС) и тепловой энергии (в котельной).

Установленную мощность ТЭЦ принять состоящей из четырех однотипных турбогенераторов, указанных в табл. 2.1. Мощность котельной принять равной суммарному отпуску тепла внешним тепловым потребителям на ТЭЦ, а выработку электроэнергии на КЭС – равной суммарной выработке электроэнергии на ТЭС. Экономичность выработки электроэнергии на КЭС принять по результатам расчетов в практическом занятии 1.

Значения η_{oi} , $\eta_{тр}$ и $\eta_{эм}$, необходимые в расчетах, принять равными величинам, заданным и полученным в практическом занятии 1. Значение энтальпии питательной воды определить по параметрам рабочего тела перед котлом.

Методические указания к практическому занятию 2.

1. Расход топлива при комбинированной выработке электроэнергии и тепла на ТЭЦ удобно определить по методу разделения расхода топлива для выработки электроэнергии и расхода для выработки отпускаемого тепла.

Количество электроэнергии, вырабатываемой на тепловом потреблении на ТЭЦ, кВт·ч/год

$$\mathcal{E}_T = \omega Q_T, \quad (2.1)$$

где Q_T – годовой отпуск тепла внешним потребителям, кДж/год; $\omega = \frac{H_i \eta_{эм}}{3600(h_{отб} - h'_{отб})}$ – удельная выработка электроэнергии на тепловом потреблении, кВт·ч/кДж; $H_i = h_0 - h_{отб}$ – действительный теплоперепад от начального состояния до давления в отборе, кДж/кг; $h_{отб}$ – энтальпия пара в регулируемом отборе турбины, кДж/кг; $h'_{отб}$ – энтальпия конденсата греющего пара сетевых подогревателей (конденсата пара отбора), кДж/кг.

Таблица 2.1

Условия и показатели	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Номинальная мощность турбины $N_э$, МВт	25	25	50	100	100	60	80	175	50	60
Параметры пара перед турбиной: - давление p_0 , МПа; - температура t_0 , °С	9,0 530	9,0 535	13,0 540	13,0 545	13,0 550	13,0 555	13,0 550	13,0 545	13,0 540	13,0 545
Конечное давление пара p_k , кПа	3,5	4	4,5	5	3,5	4,5	5	4,5	4	5,0
Теплофикационный отбор: - давление $p_{отб}$, МПа; - температура $t_{отб}$, °С; - расход $D_{отб}$, т/ч	0,12 104 90	0,12 104 80	0,10 100 160	0,12 104 280	0,10 100 290	0,12 104 180	0,08 98 200	0,10 100 400	0,11 102 165	0,10 100 175
Параметры воды перед котлом: - давление $p_{пв}$, МПа; - температура $t_{пв}$, °С	11,5 195	12 200	16 210	16,5 230	16,5 235	16 240	16,5 245	16,5 250	16 255	16,5 260
Удельный расход пара при номинальной нагрузке и конденсационном режиме d_k , кг/кВт·ч	3,7	3,75	3,65	3,5	3,6	3,65	3,68	3,4	3,70	3,65
Число часов использования электрической мощности $T_э$, ч/год	6000	6300	6500	6700	7000	6400	6100	6800	6300	7000
Число часов максимального потребления теплоты T_T , ч/год	1200	1400	1300	1500	1600	1700	1800	1400	1600	1200
КПД котла $\eta_{кв}$, %	90	91	88	89	87	86	88	91	90	87

Годовой отпуск тепла внешним потребителям, кДж/год

$$Q_T = D_{отб} \cdot 10^3 \cdot T_T \cdot n(h_{отб} - h'_{отб}), \quad (2.2)$$

где $n=4$ – количество турбогенераторов на ТЭЦ.

Расход условного топлива на выработку электроэнергии на тепловом потреблении, т/год

$$B_{ТЭЦ}^{эп} = 0,123 \frac{\mathcal{E}_T \cdot 10^{-3}}{\eta_{ка} \eta_{тр} \eta_{эм}}. \quad (2.3)$$

Расход условного топлива на выработку тепловой энергии при комбинированной выработке электроэнергии и тепла на ТЭЦ, т/год

$$B_{ТЭЦ}^T = \frac{Q_T \cdot 10^{-3}}{\eta_{ка} \eta_{тр} Q_{ут}^p}, \quad (2.4)$$

где $Q_{ут}^p=29308$ кДж/кг – теплотворная способность условного топлива.

Выработка электроэнергии по конденсационному циклу на ТЭЦ, кВт·ч/год

$$\mathcal{E}_{ТЭЦ}^k = \mathcal{E}_{год} - \mathcal{E}_T, \quad (2.5)$$

где $\mathcal{E}_{год}=N_s \cdot 10^3 \cdot n \cdot T_s$ – суммарная годовая выработка электроэнергии.

Расход условного топлива на выработку электроэнергии по конденсационному циклу на ТЭЦ

$$B_{ТЭЦ}^k = \frac{\mathcal{E}_{ТЭЦ}^k d_k (h_0 - h_{пв}) 10^{-3}}{\eta_{ка} \eta_{тр} Q_{ут}^p}, \quad (2.6)$$

где d_k – удельный расход пара при конденсационном режиме турбины, кг/кВт·ч;

$h_{пв}$ – энтальпия питательной воды (определяется по параметрам перед котлом).

Полный расход условного топлива на ТЭЦ, т/год

$$B_{ТЭЦ} = B_{ТЭЦ}^{эп} + B_{ТЭЦ}^T + B_{ТЭЦ}^k. \quad (2.7)$$

2. Расход условного топлива при отдельной выработке электроэнергии на КЭС и тепла в котельной.

Расход условного топлива на выработку электроэнергии на КЭС, т/год

$$B_{\text{КЭС}} = 0,123 \frac{\mathcal{E}_{\text{год}} \cdot 10^{-3}}{\eta_{\text{с}}}. \quad (2.8)$$

Расход условного топлива на выработку тепла в котельной, т/год

$$B_{\text{кот}} = \frac{Q_{\text{т}} \cdot 10^{-3}}{\eta_{\text{ка}} \eta_{\text{тр}} Q_{\text{ут}}^{\text{р}}}. \quad (2.9)$$

Полный расход условного топлива при отдельной выработке электроэнергии и тепла.

$$B_{\text{разд}} = B_{\text{КЭС}} + B_{\text{кот}}. \quad (2.10)$$

3. Экономия условного топлива при комбинированной выработке электроэнергии и тепла на ТЭЦ по сравнению с отдельной выработкой

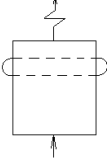
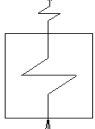
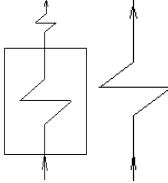
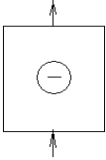
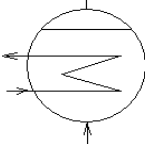
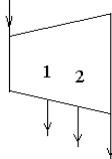
$$B_{\text{эк}} = B_{\text{разд}} - B_{\text{ТЭЦ}}. \quad (2.11)$$

Практическое занятие № 3 **Разработка тепловой схемы электростанции**

Принципиальная тепловая схема ЭС (ПТС) – это графическое изображение в условных обозначениях всех этапов технологического процесса преобразования тепловой энергии, выделившейся при сжигании органического или ядерного топлива, в электрическую и тепловую энергию для промышленных и бытовых потребителей. ПТС включает лишь основные технологические этапы, исключая подготовительные, вспомогательные, пусковые и регулировочные процессы и необходимые для этого оборудование и связи.

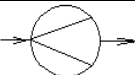
Таблица 3.1.

Условные обозначения элементов ПТС

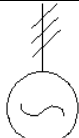












Условные обозначения	Наименование элемента
	<p>Паровой котел с естественной циркуляцией и перегревом пара</p>
	<p>Паровой котел прямоточного типа с перегревом пара</p>
	<p>Паровой котел с промежуточным перегревом пара (в данном случае прямоточный)</p>
	<p>Ядерный энергетический реактор</p>
	<p>Парогенератор АЭС</p>
	<p>Турбина одноцилиндровая однопоточная с регенеративными отборами</p>

Продолжение табл. 3.1

	<p>Турбина одноцилиндровая двухпоточная с регенеративными отборами</p>
	<p>Регенеративный подогреватель (теплообменник) смешивающего типа</p>
	<p>Регенеративный подогреватель (теплообменник) поверхностного типа</p>
	<p>Испаритель (паропреобразователь)</p>
	<p>Деаэратор</p>
	<p>Насос</p>
	<p>Потребитель тепловой энергии</p>
	<p>Редукционно-охлаждающая установка (РОУ)</p>
	<p>Струйный насос (эжектор)</p>

	Измерительная диафрагма
---	-------------------------

Окончание табл. 6.1

	Трехфазный электрогенератор
	Свежий пар (независимо от параметров)
	Паропроводы с $P > 20$ МПа
	Паропроводы с $P < 20$ МПа
	Паропроводы "горячего" промперегрева пара
	Паропроводы "холодного" промперегрева пара
	Трубопроводы питательной воды
	Трубопроводы основного конденсата
	Трубопроводы сырой воды
	Трубопроводы сетевой воды
	Трубопроводы химобессоленной воды
	Дренажные трубопроводы
	Трубопроводы паровоздушной смеси

Задание 3.1. Используя условные обозначения из таблицы 3.1, изобразить принципиальную схему конденсационной электростанции с промежуточным перегревом пара и регенеративным подогревом питательной воды.

Задание 3.2. Используя условные обозначения из таблицы 3.1, изобразить принципиальную схему ТЭЦ с промежуточным перегревом пара и регенеративным подогревом питательной воды.

Практическое занятие 4

Расчет тепловой схемы электростанции

Составить и рассчитать принципиальную тепловую схему ТЭЦ по данным, приведенным в табл. 4.1. Пример принципиальной тепловой схемы паротурбинной установки представлен на рис 4.1.

Для расчета принципиальной тепловой схемы необходимо построить hs -диаграмму с указанием всех точек отборов пара на регенеративный подогрев питательной воды с указанием их параметров.

Требующиеся для расчета дополнительные величины принять по данным рекомендуемых учебных пособий или справочной литературе.

В расчете принять:

1. Типы котлов: энергетических – барабанные; пиковых – водогрейные.
2. Электромеханический КПД турбогенератора $\eta_{эм}=0,97$.
3. Тип деаэратора: повышенного давления $p_d=0,6$ МПа.
4. При выборе схемы использования тепла продувочной воды при двухступенчатой схеме сепарации принять: выпар из первой ступени направляется в деаэратор, из второй – поступает в ПНД – 2; тепло продувочной воды после сепараторов используется для подогрева химически обессоленной воды в поверхностном теплообменнике.
5. Конденсат пара, расходуемого на собственные нужды котельного и турбинного цехов, не теряется; энтальпию конденсата принять равной энтальпии питательной воды в деаэраторе.
6. Внутростанционные потери конденсата принять условно из деаэратора.
7. Коэффициент полезного действия деаэратора, регенеративных и сетевых подогревателей принять $\eta_n=0,98$.
8. Коэффициент полезного действия питательного насоса принять $\eta_n=0,81$.
9. Характеристику теплофикационных турбин принять по табл. 3.1.

10. Все регенеративные подогреватели принимаются со встроенными охладителями конденсата греющего пара. Переохлаждение конденсата принимается до значения энтальпии на 40 кДж/кг выше энтальпии питательной воды на входе в подогреватель.

Таблица 4.1

Условия и показатели	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Электрическая мощность ТЭЦ, $N_{э}$, МВт	25	25	50	100	25	25	60	60	50	175
Тип турбоустановок	T-25-90	T-25-90	T-50-130	T-100-130	ПТ-25-90/10	ПТ-25-90/10	ПТ-60-90/13	ПТ-60-130/13	ПТ-50-130/7	T-175/210-130
Параметры перед турбиной: - давление p_0 , МПа; - температура, t_0 , °С	9,0 500	9,0 500	13,0 565	13,0 565	9,0 500	9,0 535	9,0 535	13,0 565	13,0 565	13,0 550
Давление в конденсаторе, p_k кПа	3,5	4	4,5	5	3,5	4	3,5	4,5	5	4
Внутренний относительный КПД по отсекам: ЧВД, $\eta_{oi}^{ЧВД}$; ЧСД, $\eta_{oi}^{ЧСД}$; ЧНД, $\eta_{oi}^{ЧНД}$	0,82 - 0,70	0,82 - 0,70	0,83 - 0,74	0,84 - 0,76	0,80 0,83 0,70	0,80 0,83 0,70	0,81 0,85 0,71	0,82 0,87 0,72	0,82 0,86 0,72	0,85 - 0,76
Коэффициент дросселирования пара в регулирующих клапанах: ЧВД, $\eta_{др}^{ЧВД}$; ЧСД, $\eta_{др}^{ЧСД}$; ЧНД, $\eta_{др}^{ЧНД}$	0,96 - 0,86	0,96 - 0,85	0,95 - 0,845	0,96 - 0,88	0,95 0,86 0,82	0,96 0,87 0,83	0,96 0,86 0,85	0,96 0,88 0,86	0,95 0,87 0,88	0,96 - 0,90

Продолжение таблицы 4.1

Условия и показатели	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Давление регулируемых отборов: - промышленного, $p_{пр}$, МПа; - теплофикационного, $p_{от}$, МПа	- 0,12	- 0,12	- 0,10	- 0,08	1,0 0,12	1,0 0,12	1,3 0,12	1,3 0,10	0,7 0,08	- 0,09
Отбор пара из промышленного отбора, $D_{пр}$, т/ч	-	-	-	-	72	70	140	115	118	-
Возврат конденсата с производства, $\alpha_{вк}$, %	-	-	-	-	60	50	70	40	50	-
Энтальпия конденсата, возвращаемого с производства, $h_{вк}$, кДж/кг	-	-	-	-	290	250	170	210	170	-
Нагрузка теплофикационного отбора, $Q_{от}$, ГДж/ч	210	190	280	660	120	105	210	170	250	1250
Температурный график сети, t_2/t_1 , °С	150/ 70	140/ 65	150/ 70	145/ 67	130/ 60	150/ 70	120/ 55	130/ 60	150/ 70	140/ 65
Продувка котлов (в % от $D_{пк}$), $\alpha_{пр}$, %	1,5	1,8	2,0	1,4	1,6	1,8	2,0	1,3	1,5	1,6
Количество ступеней сепаратора непрерывной продувки	1	2	2	2	1	1	2	2	1	2
Паровые собственные нужды котельного отделения (в % от $D_{пк}$), $\alpha_{сн}^{ка}$, %	1,25	1,30	1,20	1,10	1,20	1,20	1,25	1,30	1,1	1,15

Окончание таблицы 4.1

Условия и показатели	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Паровые собственные нужды турбинного отделения (в % от $D_{ПК}$), $\alpha_{СН}^{МЗ}$	1,20	1,25	1,10	1,15	1,00	1,10	1,15	1,10	1,00	1,10
Внутристанционные потери конденсата (в % от $D_{ПК}$), $\alpha_{вт}$	2,0	1,70	1,50	1,60	1,20	1,25	1,30	1,40	1,35	1,40
Температура химочищенной воды, $t_{хов}$, °С	30	28	28	28	35	32	30	35	30	30
Нагрев воды в сальниковом и эжекторном подогревателях, $\Delta t_{эж}$, °С	3,0	4,0	3,5	2,5	3,0	3,3	3,5	3,2	3,0	3,5

Методические указания к практическому занятию 4.

По данным табл. 4.1 составляется принципиальная тепловая схема станции и строится процесс расширения пара в турбине в диаграмме hs . На схеме наносятся обозначения, и составляется таблица величин основных параметров пара и конденсата, питательной воды и тепловых нагрузок. Пример построения hs -диаграммы расширения пара в турбине с семью отборами показан на рис. 4.2.

Процесс расширения пара в турбине в диаграмме hs строится по заданным начальным и конечным параметрам пара, внутренним относительным КПД по отсекам с учетом дросселирования пара в регулирующих клапанах частей высокого, среднего и низкого давлений турбины. Все параметры для построения процесса расширения пара в диаграмме hs принимаются по данным табл. 4.1.

Ниже приводится рекомендуемая последовательность расчета ПТС теплоэлектростанции с турбоустановкой типа ПТ, имеющей два регулируемых отбора пара (промышленный и теплофикационный) и семиступенчатый регенеративный подогрев питательной воды (четыре ПНД и три ПВД). Деаэратор по греющему пару включен в отбор вышестоящего ПВД. Продувка из барабана котла осуществляется через две ступени сепараторов. Выпар из первой ступени сепаратора направляется в деаэратор с давлением 0,6 МПа, второй ступени – в ПНД-2. Сепарат из второй ступени сепаратора поступает в водо-водяной подогреватель и осуществляет подогрев воды, поступающей на химводоочистку.

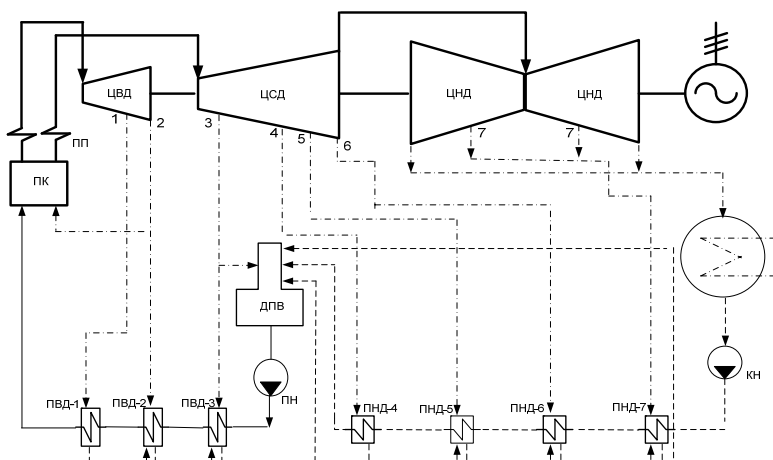


Рис 4.1. Принципиальная тепловая схема паротурбинной установки с промежуточным перегревом пара и регенеративными отборами

1. Расчет расходов пара и воды

Расход пара на сетевой подогреватель

$$D_{\text{СП}} = \frac{Q_{\text{СП}}}{(h_{\text{от}} - h_{\text{др.от}}) \eta_{\text{п}}}, \quad (4.1)$$

где $h_{\text{от}}$ – энтальпия пара в отборе на сетевой подогреватель;

$h_{др.от}$ – энтальпия конденсата греющего пара в сетевом подогревателе (может быть принята равной энтальпии насыщенной воды);

$Q_{сп} = Q_{от} \frac{t_{сп} - t_1}{t_2 - t_2}$ – количество теплоты, вырабатываемое сетевым подогревателем, где $t_{сп} = t_{от} - (3...5) \text{ } ^\circ\text{C}$ – температура сетевой воды на выходе из основного сетевого подогревателя; t_1, t_2 – температура сетевой воды в тепловой сети (см. табл. 4.1); $Q_{от}$ – нагрузка теплофикационного отбора (см. табл. 4.1).

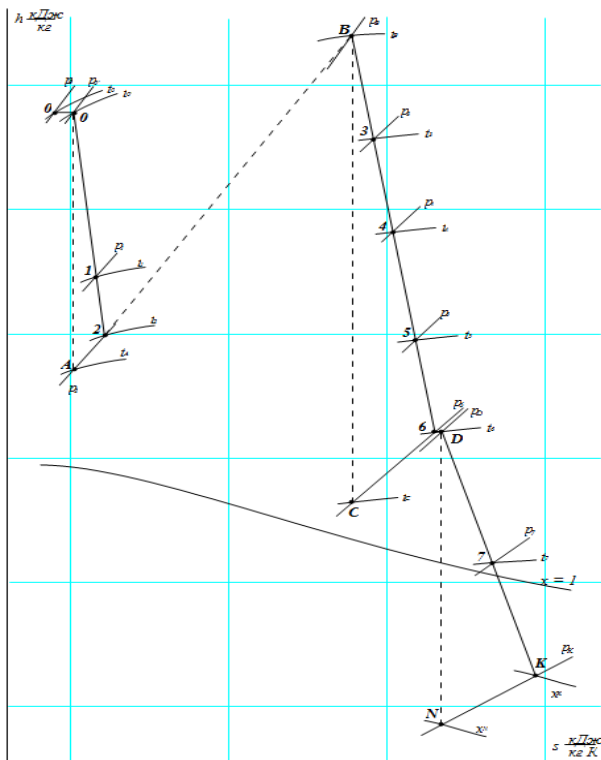


Рис. 4.2. Пример построения hs -диаграммы расширения пара в турбине с семью отборами

Оставшееся количество теплоты ($Q_{от} - Q_{сп}$) вырабатывается пиковым водогрейным котлом.

Коэффициенты недовыработки мощности паром производственного и отопительного отборов соответственно равны

$$y_{\text{пр}} = \frac{H_i - H_{\text{пр}}}{H_i}, \quad (4.2)$$

$$y_{\text{от}} = \frac{H_i - H_{\text{от}}}{H_i}, \quad (4.3)$$

где H_i – использованный теплоперепад в турбине, равный

$$H_i = H_0^{\text{ЦВД}} \eta_{oi}^{\text{ЦВД}} + H_0^{\text{ЦСД}} \eta_{oi}^{\text{ЦСД}} + H_0^{\text{ЦНД}} \eta_{oi}^{\text{ЦНД}}, \quad (4.4)$$

$H_{\text{пр}}$ – использованный теплоперепад в турбине до производственного отбора, равный

$$H_{\text{пр}} = H_0^{\text{ЦВД}} \eta_{oi}^{\text{ЦВД}},$$

$H_{\text{от}}$ – использованный теплоперепад в турбине до отопительного отбора, равный

$$H_{\text{от}} = H_0^{\text{ЦВД}} \eta_{oi}^{\text{ЦВД}} + H_0^{\text{ЦСД}} \eta_{oi}^{\text{ЦСД}},$$

$H_0^{\text{ЦВД}}$, $H_0^{\text{ЦСД}}$, $H_0^{\text{ЦНД}}$ – адиабатические располагаемые теплоперепады в ЦВД, ЦСД и ЦНД турбины соответственно.

Расход пара на турбину с учетом отборов пара на регенеративный подогрев питательной воды

$$D_T = \beta_p \left(\frac{3600 N_{\Sigma}}{H_i \eta_{\text{эм}}} + y_{\text{пр}} D_{\text{пр}} + y_{\text{от}} D_{\text{сп}} \right). \quad (4.5)$$

Коэффициент регенерации β_p для теплофикационных турбин можно принять равным 1,12...1,15.

Расход пара нетто от энергетических котлов

$$D_{\text{ка}}^{\text{н}} = D_T + D_{\text{сн}}^{\text{мз}} = D_T \left(1 + \frac{\alpha_{\text{сн}}^{\text{мз}}}{100} \right). \quad (4.6)$$

Паропроизводительность котлов брутто

$$D_{\text{ка}}^{\text{бр}} = \frac{D_{\text{ка}}^{\text{н}}}{1 - \frac{\alpha_{\text{сн}}^{\text{ка}}}{100}}. \quad (4.7)$$

Расход пара на собственные нужды котельного цеха

$$D_{\text{сн}}^{\text{ка}} = D_{\text{ка}}^{\text{бр}} - D_{\text{ка}}^{\text{н}}. \quad (4.8)$$

Расход питательной воды с учетом продувки котлов

$$G_{\text{пв}} = D_{\text{ка}}^{\text{бр}} \left(1 + \frac{\alpha_{\text{пр}}}{100} \right). \quad (4.9)$$

Расход продувочной воды

$$G_{\text{пр}} = G_{\text{пв}} - D_{\text{ка}}^{\text{бр}}. \quad (4.10)$$

1. Расчет сепараторов продувки

Материальный баланс первой ступени

$$G_{\text{пр}} = D_{\text{с},1} + G_{\text{пр},1}. \quad (4.11)$$

Тепловой баланс первой ступени

$$G_{\text{пр}} h'_6 = D_{\text{с},1} h''_{\text{с},1} + G_{\text{пр},1} h'_{\text{с},1}, \quad (4.12)$$

где $D_{\text{с},1}$ – выпар из первой ступени, направляемый в деаэратор;
 $G_{\text{пр},1}$ – расход продувочной воды, направляемой из первой ступени во вторую;

h'_6 – энтальпия насыщенной воды в барабане котла;

$h''_{\text{с},1}, h'_{\text{с},1}$ – энтальпии сухого насыщенного пара и насыщенной воды при параметрах первой ступени сепараторов продувки.

Из совместного решения уравнений (4.11) и (4.12) получим

$$D_{\text{с},1} = \frac{h'_6 - h'_{\text{с},1}}{h''_{\text{с},1} - h'_{\text{с},1}} G_{\text{пр}}. \quad (4.13)$$

Из совместного решения аналогичных уравнений материального и теплового балансов для второй ступени сепараторов продувки получим расход выпара второй ступени:

$$D_{\text{с},2} = \frac{h'_{\text{с},1} - h'_{\text{с},2}}{h''_{\text{с},2} - h'_{\text{с},2}} G_{\text{пр},1}. \quad (4.14)$$

Расход продувочной воды, поступающей в водоводяной подогреватель химводоочистки,

$$G_{\text{пр},2} = G_{\text{пр},1} - D_{\text{с},2}. \quad (4.15)$$

Здесь $h''_{\text{с},2}$ и $h'_{\text{с},2}$ – энтальпии сухого насыщенного пара и насыщенной воды при параметрах второй ступени сепараторов продувки.

Расход химически очищенной воды, поступающей в деаэратор,

$$G_{\text{ХОВ}} = G_{\text{пр},2} + G_{\text{ут}} + D_{\text{сн}}^{\text{ка}}. \quad (4.16)$$

Энтальпия химически очищенной воды после подогревателя непрерывной продувки (на входе в деаэратор) определяется из его теплового баланса:

$$h_{\text{ХОВ}}^{\text{д}} = h_{\text{ХОВ}} + \frac{G_{\text{пр},2}(h'_{\text{с},2} - h_{\text{ХОВ}}^{\text{дп}})}{G_{\text{ХОВ}}}, \quad (4.17)$$

где $h_{\text{ХОВ}}^{\text{дп}}$ – энтальпия дренажа после подогревателя химочищенной воды, определяемая из условия, что $t_{\text{ХОВ}}^{\text{дп}} = t_{\text{ХОВ}} + 10$.

2. Расчет регенеративных подогревателей.

Расчет выполняется последовательно, начиная от подогревателя наиболее высокого давления (ПВД -7).

Расход пара на ПВД -7 определяется из его уравнения теплового баланса:

$$D_7 = \frac{G_{\text{пв}}(h_{\text{пв}} - h'_{\text{в}1})}{\eta_{\text{п}}(h_7 - h_{\text{др},7})}, \quad (4.18)$$

где $h_{\text{пв}}$ – энтальпия питательной воды определяется по параметрам перед котлом;

$h'_{\text{в}1}$ – энтальпия питательной воды после ПВД-6;

h_7 и $h_{\text{др},7}$ – энтальпии пара в отборе на ПВД-7 и дренажа из ПВД -7 соответственно.

Для определения величины $h'_{\text{в}1}$ (так же, как и последующих) предварительно разбивается интервал подогрева питательной воды от деаэратора $t_{\text{д}}$ до $t_{\text{пв}}$ по закону арифметической прогрессии, т.е.

$$t_{\text{пв}} - t'_{\text{в}1} = t'_{\text{в}1} - t'_{\text{в}} = t'_{\text{в}} - t_{\text{д}} = \frac{t_{\text{пв}} - t_{\text{д}}}{3}. \quad (4.19)$$

Энтальпия дренажа $h_{др,7}$ (так же, как и для последующих подогревателей) определяется по температуре дренажа, принимаемой равной

$$t_{др,7} = t'_{v1} + 10. \quad (4.20)$$

Расход пара на ПВД-6 определяется также из его уравнения теплового баланса с учетом слива в него дренажа из ПВД -7:

$$D_6 = \frac{G_{пв}(h'_{v1} - h'_v) - D_7(h_{др,7} - h_{др,6})\eta_{п}}{\eta_{п}(h_6 - h_{др,6})}, \quad (4.21)$$

где h'_v – энтальпия питательной воды после ПВД-5;

h_6 и $h_{др,6}$ – энтальпии пара в отборе на ПВД-6 и дренажа из ПВД-6 соответственно.

Расход пара на ПВД-5 аналогично

$$D_5 = \frac{G_{пв}(h'_v - h_{пн}) - (D_7 + D_6)(h_{др,6} - h_{др,5})\eta_{п}}{\eta_{п}(h_5 - h_{др,5})}, \quad (4.22)$$

где h_5 и $h_{др,5}$ – энтальпии пара в отборе на ПВД-5 и дренажа из ПВД-5 соответственно;

$h_{пн}$ – энтальпия питательной воды на входе ПВД-5.

С учетом повышения энтальпии в питательном насосе

$$h_{пн} = h'_d + \Delta h_{пн},$$

$$\Delta h_{пн} = \frac{\Delta p_{пн} v_{ср}}{\eta_{п}},$$

где h'_d – энтальпия воды в деаэраторе;

$\Delta p_{пн}$ – повышение давления в питательном насосе;

$v_{ср}$ – среднее значение удельного объема воды в питательном насосе.

После расчета системы регенеративного подогрева питательной воды составляем уравнения:

- материального баланса деаэратора Д

$$G_{пв} + G_{ут} = D_7 + D_6 + D_5 + G_{хов} + D_{сн}^{M3} + D_{с,1} + G_{вк} + G'_k + D_d; \quad (4.23)$$

- теплового баланса деаэратора

$$(G_{\text{пв}} + G_{\text{ут}})h'_d = (D_7 + D_6 + D_5)h_{\text{др},5} + G_{\text{хов}}h_{\text{хов}}^d + D_{\text{сн}}^{\text{мз}}h'_d + D_{\text{с},1}h'_{\text{с},1} + G_{\text{вк}}h_{\text{вк}} + G'_k h'_{\text{IV}} + D_d h_d \eta_{\text{п}}, \quad (4.24)$$

где D_d – расход пара на деаэратор;

h_d – энтальпия пара в отборе на деаэратор;

G'_k – расход основного конденсата турбоустановки (на входе в деаэратор);

h'_{IV} – энтальпия основного конденсата на вход в деаэратор (после ПНД-4).

Для определения величины h'_{IV} задаемся недогревом конденсата до t_d , равным 15...20°C, т.е.

$$h'_{\text{IV}} = t_d - (15 \dots 20), \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Из совместного решения уравнений (4.23) и (4.24) определяются неизвестные величины D_d и G'_k .

Расход пара на ПНД - 4

$$D_4 = \frac{G'_k(h'_{\text{IV}} - h'_{\text{III}})}{\eta_{\text{п}}(h_4 - h_{\text{др},4})}, \quad (4.25)$$

где h'_{III} – энтальпия основного конденсата после ПНД-3;

h_4 и $h_{\text{др},4}$ – энтальпии пара в отборе на ПНД-4 и дренажа из ПНД-4 соответственно.

Расход пара на ПНД-3

$$D_3 = \frac{G'_k(h'_{\text{III}} - h_{\text{см},1}) - D_4(h_{\text{др},4} - h_{\text{др},3})\eta_{\text{п}}}{\eta_{\text{п}}(h_3 - h_{\text{др},3})}, \quad (4.26)$$

где h_3 и $h_{\text{др},3}$ – энтальпии пара в отборе на ПНД-3 и дренажа из ПНД-3 соответственно;

$$h_{\text{см},1} = \frac{(G'_k - D_{\text{сн}})h'_{\text{II}} + D_{\text{сн}}h_{\text{др},\text{от}}}{G'_k}. \quad (4.27)$$

Расход пара на ПНД-2

$$D_2 = \frac{(G'_k - D_{\text{сп}})(h'_{\text{II}} - h_{\text{см,2}}) - \eta_{\text{II}} [D_{\text{с,2}}(h''_{\text{с,2}} - h_{\text{др,2}}) + (D_4 + D_3)(h_{\text{др,3}} - h_{\text{др,2}})]}{\eta_{\text{II}}(h_2 - h_{\text{др,2}})}, \quad (4.28)$$

где h_2 и $h_{\text{др,2}}$ – энтальпии пара в отборе на ПНД-2 и дренажа из ПНД-2 соответственно;

$h_{\text{см,2}}$ – энтальпия основного конденсата перед ПНД-2.

Расход пара на ПНД-1

$$D_1 = \frac{D_{\text{к}}(h'_1 - h_{\text{к}}) - \eta_{\text{I}} [(D_4 + D_3 + D_2 + D_{\text{с,2}})(h_{\text{др,2}} - h_{\text{др,1}})]}{\eta_{\text{I}}(h_1 - h_{\text{др,1}})}, \quad (4.29)$$

где h_1 и $h_{\text{др,1}}$ – энтальпии пара в отборе на ПНД-1 и дренажа из ПНД-1 соответственно;

$D_{\text{к}}$ – расход основного конденсата (на входе в ПНД-1), определяемый из уравнения материального баланса.

$$D_{\text{к}} = G'_k - (D_{\text{сп}} + D_4 + D_3 + D_2 + D_1 + D_{\text{с,2}}). \quad (4.30)$$

Для определения неизвестных величин D_2 , D_1 , $D_{\text{к}}$ и $h_{\text{см,2}}$ при совместном решении уравнений (4.28), (4.29) и (4.30) необходимо привлечь уравнение смешения на входе в ПНД-1 в виде

$$h_{\text{см,2}} = \frac{(D_4 + D_3 + D_2 + D_1 + D_{\text{с,2}})h_{\text{др,1}} + D_{\text{к}}h'_{\text{к}}}{D_4 + D_3 + D_2 + D_1 + D_{\text{с,2}} + D_{\text{к}}}. \quad (4.31)$$

Проверка материального баланса турбоустановки

$$D'_T = D_7 + D_6 + D_5 + D_{\text{д}} + D_4 + D_3 + D_2 + D_1 + D_{\text{к}} + D_{\text{сп}} + D_{\text{пр}}. \quad (4.32)$$

Полученное значение сопоставляется с принятым ранее значением D_T и определяется разбаланс решения:

$$\Delta D'_T = \frac{|D'_T - D_T|}{D_T} 100\%. \quad (4.33)$$

Определяется электрическая мощность турбины:

$$N'_3 = \left[\left(\sum_{j=1}^{j=7} H_{\text{отб},j} D_{\text{отб},j} \right) + D_{\text{к}} H_{\text{к}} \right] \eta_{\text{эм}}, \quad (4.34)$$

где $H_{отб,j} = h_0 - h_j$ – действительный теплоперепад до j -го отбора пара (в число j входят отборы на деаэратор, промышленный и отопительный отборы);

$H_0 = h_0 - h_k$ – полный действительный теплоперепад конденсационного потока пара.

Уточняется расход пара на турбину

$$\Delta D_T = \beta_p \frac{3600 \Delta N_3}{H_k \eta_{эм}}, \quad (4.35)$$

где $\Delta N_3 = N'_3 - N_3$, причем ΔD_T и ΔN_3 могут иметь как положительное так и отрицательное значение.

Уточненные значения расхода пара на турбину

$$D_T'' = D_T + \Delta D_T \quad (4.36)$$

и коэффициента регенерации

$$\beta_p'' = \frac{D_T''}{\frac{3600 N'_3}{H_k \eta_{эм}} + \gamma_{пр} D_{пр} + \gamma_{от} D_{сп}}. \quad (4.37)$$

Расход условного топлива на ТЭЦ

$$B_y = \frac{D_{ка}^{бр} (h_0 - h_{пв})}{Q_{нв}^p \eta_{ка} \eta_{тр}}, \quad (4.38)$$

где $\eta_{тр}$ – принимается по результатам решения практического занятия 1.

КПД по производству электроэнергии

$$\eta_э = \frac{3600 N_3}{D_{ка}^{бр} (h_0 - h_{пв}) - \left(Q_{пр} - \frac{Q_{сп}}{\eta_{п}} \right)}. \quad (4.39)$$

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тепловые электрические станции. Схемы и оборудование : учеб. пособие / А.А. Кудинов. — М. : ИНФРА-М, 2018. -325 с.
<http://znanium.com/bookread2.php?book=935473>
2. Тепловые электрические станции: учеб. для вузов / В. Я. Рыжкин ; под ред. В. Я. Гиршфельда. - Изд. 3-е, перераб. и доп. - М. : Энергоатомиздат, 1987. - 326 с.
3. Тепловые и атомные электростанции: учебник для вузов / Л. С. Стерман, В. М. Лавыгин, С. Г. Тишин. - Изд. 2-е, перераб. и доп. - М.: Энергоиздат, 1982. - 455 с.
4. Проектирование и строительство тепловых электростанций/ И. П. Купцов, Ю. Р. Иоффе. - М. : Энергоатомиздат, 1985. - 407 с.
5. Теплоэнергетика и теплотехника: справочная серия: в 4 кн. / под общей редакцией А.В. Клименко и В.М. Зорина. – 4-е изд., стереотип. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. Кн. 3: Тепловые и атомные электростанции. – 648 с.
6. *Стерман Л.С., Лавыгин В.М., Тишин С.Г.* Тепловые и атомные электрические станции. Учебник для вузов – 2-е изд. перераб. – М.: Издательство МЭИ, 2000. – 408 с., ил.
7. Тепловые и атомные электростанции: учеб.-метод. комплекс/ сост. Б. Л. Паскарь. - СПб. : Изд-во СЗТУ, 2008. - 176 с.

Содержание

Введение.....	3
Практическое занятие 1. Расчет энергетических показателей....	4
Практическое занятие 2. Сопоставление комбинированной и раздельной выработок тепловой и электрической энергии	9
Практическое занятие 3. Разработка тепловой схемы электро- станции.....	12
Практическое занятие 4. Расчет тепловой схемы электростан- ции.....	16
Библиографический список.....	29

ТЕПЛОВЫЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

***Методические указания к практическим занятиям
для студентов бакалавриата направления 13.03.01***

Сост. *В.В. Андреев*

Печатается с оригинал-макета, подготовленного кафедрой
теплотехники и теплоэнергетики

Ответственный за выпуск *В.В. Андреев*

Лицензия ИД № 06517 от 09.01.2002

Подписано к печати 06.11.2020. Формат 60×84/16.
Усл. печ. л. 1,8. Усл.кр.-отт. 1,8. Уч.-изд.л. 1,5. Тираж 75 экз. Заказ 826.

Санкт-Петербургский горный университет
РИЦ Санкт-Петербургского горного университета
Адрес университета и РИЦ: 199106 Санкт-Петербург, 21-я линия, 2