ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САХАЛИНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

В. П. Максимов, И. Г. Минервин, О. А. Федоров

ОБЩАЯ ЭНЕРГЕТИКА

Практикум для студентов направления
140400.62 «Электроэнергетика и электротехника»

г. Южно-Сахалинск
СахГУ
2016 г.

УДК 620(075)
ББК 31я73
М171

Печатается по решению учебно-методического совета Сахалинского государственного университета, 2014 г.

Рецензент:
Григорьев Н. П., *доцент кафедры «Системы электроснабжения» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Дальневосточный государственный университет путей сообщения», канд. тех. наук, доцент.*

М171 **Максимов, В. П. Общая энергетика :** практикум для студентов направления 140400.62 «Электроэнергетика и электротехника» / В. П. Максимов, И. Г. Минервин, О. А. Федоров. – Южно-Сахалинск : СахГУ, 2016. – 80 с.
ISBN 978-5-88811-515-2

Практикум по общей энергетике соответствует требованиям государственных образовательных стандартов высшего профессионального образования по направлению подготовки бакалавров 140400.62 «Электроэнергетика и электротехника».

Практикум включает задание на контрольную работу и методические указания к ее выполнению; практические работы, методические указания к их выполнению, рабочую программу, тематический план, перечень основной и дополнительной литературы, тестовые задания.

УДК 620(075)
ББК 31я73

© Максимов В. П., 2016
© Минервин И. Г., 2016
© Федоров О. А., 2016
© Сахалинский государственный университет, 2016

ISBN 978-5-88811-515-2

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ 4
2. ПРАКТИЧЕСКИЕ РАБОТЫ 6
3. РАБОЧАЯ ПРОГРАММА 24
3.1. Содержание дисциплины 24
3.2. Место дисциплины в структуре основной образовательной программы 29
4. ПРИМЕРНОЕ ТЕСТОВОЕ ЗАДАНИЕ 32
5. ТЕМАТИКА ПРЕЗЕНТАЦИЙ 39
6. КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА 43
7. СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ 64
7.1. Основная литература 64
7.2. Дополнительная литература 64
ПРИЛОЖЕНИЯ
Приложение А. Диаграмма h-s водяного пара 67
Приложение Б. Физические свойства воды на линии насыщения 68
Приложение В. Физические свойства водяного пара на линии насыщения 69
Приложение Г. Физические свойства водяного пара на линии насыщения 73
Приложение Д. Физические свойства сухого воздуха 73
Приложение Е. Справочные данные к контрольной работе 74

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Современное развитие человеческой цивилизации немыслимо без развития энергетики. Уровень развития любой цивилизации определяется уровнем энергии, которой цивилизация может управлять. Энергетика определяется как отрасль хозяйства, охватывающая энергетические ресурсы, выработку, преобразование, передачу и использование различных видов энергии. Кроме того, энергетика включает в себя и научное направление исследований, занимающееся изучением сути всех энергетических преобразований, а также созданием новых направлений использования энергии в интересах человека.

Повышение производительности труда, условием которой является автоматизация производственных процессов, ведущие ученые мира связывают, прежде всего, с применением электрической энергии. Основными потребителями электроэнергии в производстве товаров и при оказании услуг являются электрические машины и аппараты, мощность которых варьируется от единиц ватт до десятков мегаватт.

Кроме того, рост духовных и материальных потребностей жителей Земли неуклонно сопровождается увеличением спроса на электроэнергию в домохозяйствах, ростом личного электропотребления человека, повышением социальных расходов на коллективное освещение, меры безопасности, здравоохранение и культурный отдых.

Для производства электрической энергии в основном применяются различные электростанции, основным процессом которых является сжигание природных энергетических ресурсов. Вместе с тем запасы традиционного природного топлива (нефти, угля, газа и др.) не бесконечны. Ограничены запасы и ядерного топлива – урана и тория, из которого с помощью реакторов можно получать плутоний. Поэтому на сегодняшний день важно не только развивать добычу экономически выгодных источников энергии, но и рационально использовать имеющиеся природные ресурсы для производства электроэнергии без существенного ущерба окружающей среде.

Электроэнергетика – ведущая отрасль энергетики, обеспечивающая рациональное производство и распределение элек-

трической энергии. Электроэнергетика имеет важное значение в экономике любой страны, что объясняется такими преимуществами электроэнергетики перед энергией других видов, как относительная доступность передачи ее на большие расстояния, распределения между потребителями, а также преобразование в другие виды энергии (механическую, тепловую, химическую, световую и др.).

В силу специфики своего производства электроэнергетика занимает особое положение. Если во всех отраслях народного хозяйства исходное сырье путем последовательного его преобразования находит свое воплощение в каком-то конкретном продукте, то в электроэнергетике химическая энергия, запасенная в топливе, энергия падения воды, солнечная, ветровая и другие виды энергии проходят путь последовательного преобразования в тепловую, механическую и, наконец, в электрическую энергию. Промежуточным продуктом в этом процессе преобразования энергии, получившим широкое потребительское значение, является тепловая энергия.

Учебная дисциплина «Общая энергетика» рассматривает общие вопросы производства и преобразования электрической энергии, характерные для всех способов ее производства. Поэтому основной целью дисциплины является формирование профессиональных компетенций об устройстве, эксплуатации электростанций различного типа, способах выработки и передачи электрической энергии, научных основах преобразования видов энергии, проблемах эффективного использования энергоресурсов и способах их сбережения.

Формируемые профессиональные компетенции позволят выпускникам успешно решать задачи профессиональной деятельности, связанной с проектированием, обслуживанием и эксплуатацией объектов электроэнергетики.

2. ПРАКТИЧЕСКИЕ РАБОТЫ

Задача 1

Паросиловая установка работает по циклу Ренкина. Параметры начального состояния: p_1 = 120 бар, t_1 = 550 °С. Давление в конденсаторе p_2 = 0,04 бара. Определить термический КПД цикла.

Порядок решения. Термический КПД цикла Ренкина равен:

$$\eta_t = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{ПВ}},$$

где по диаграмме h-s водяного пара (приложение А) находим h_1 и h_2 – энтальпии начального и конечного состояния пара при адиабатном расширении в турбине;

$h_{ПВ}$ – энтальпия питательной воды, $h_{ПВ} = c_p \cdot t_Н$,

где c_p – удельная теплоемкость воды, c_p = 4,19 кДж/(кг · К),

$t_Н$ – температура насыщенного пара в конденсаторе, см. h-s диаграмму.

Задача 2

Паровая турбина мощностью N = 12000 кВт работает при начальных параметрах p_1 = 8 МПа и t_1 = 450 °С. Давление в конденсаторе p_2 = 0,4 МПа. В котельной установке, снабжающей турбину паром, сжигается уголь с теплотой сгорания $Q_С$ = 25 МДж/кг. КПД котельной установки равен $\eta_{КУ}$ = 0,8. Температура питательной воды $t_{ПВ}$ = 90 °С.

Определить производительность котельной установки и часовой расход топлива при полной нагрузке паровой турбины и условиях, что она работает по циклу Ренкина.

Порядок решения. Удельный расход пара турбины:

$$d_î = \frac{3600}{h_1 - h_2}, êã/(êÂò \cdot ÷).$$

Энтальпию h_1 и h_2 находим по h-s диаграмме (приложение А).

Расход пара паровой турбиной $D_О$:

$$D_î = N \cdot d_î \text{ , } êã/÷.$$

Часовой расход топлива B равен:

$$B = \frac{D_o \left(h_1 - h_{ПВ} \right)}{Q_C \cdot \eta_{КУ}}, \text{ кг/ч},$$

где энтальпия питательной воды $h_{ПВ} = c_p \cdot t_{ПВ}$.

Как пользоваться h-s диаграммой

Пусть начальные параметры пара будут: давление пара p_1 = 10 МПа, температура пара t_1 = 450 °С. Пар адиабатно расширяется в турбине до давления p_2 = 0,05 МПа.

Адиабатный процесс на h-s диаграмме – это вертикальная линия (горизонтальная линия – дросселирование).

Итак, начальное давление и температура у нас есть. Найдем эту точку на h-s диаграмме. Нам нужна изобара, соответствующая давлению 10 МПа, или 100 бар, и изотерма, соответствующая температуре 450 °С. На их пересечении и будет точка, соответствующая начальным параметрам пара в нашей задаче.

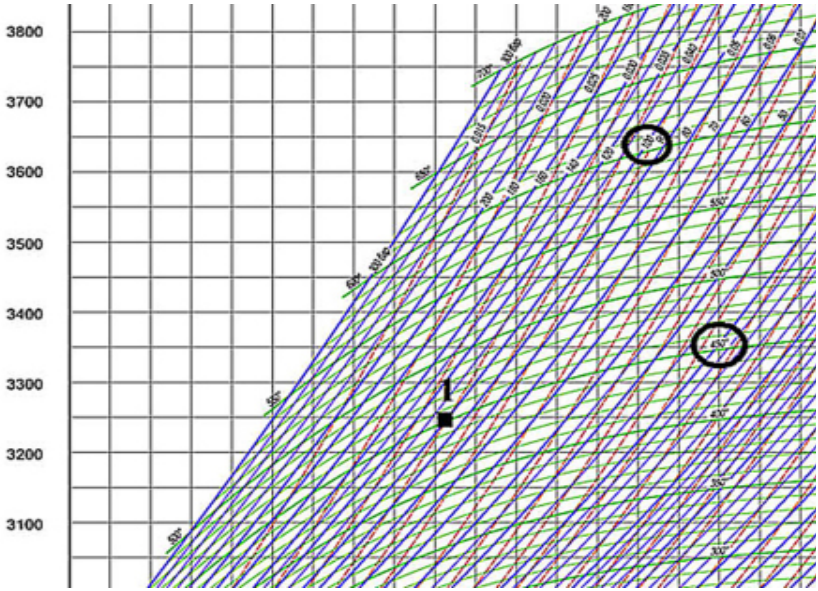


Рис. 1 – Фрагмент h-s диаграммы: нахождение точки 1

Найдя эту точку, можно определить энтальпию и энтропию в этой точке. Опустив на оси проекции найденной точки, узнаем значения энтальпии (ось «Y») и энтропии (ось «X»):

$$h = 3240 \text{ кДж/кг}, s = 6{,}42 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}.$$

Далее нам нужно узнать параметры пара после адиабатного расширения.

Пар расширился, и его давление в точке 2 $p_2 = 0{,}05$ МПа (0,5 бар).

На h-s диаграмме адиабатный процесс изображается в виде вертикальной линии.

Проведем эту линию из точки 1 (начальные параметры) до пересечения с изобарой 0,05 бар.

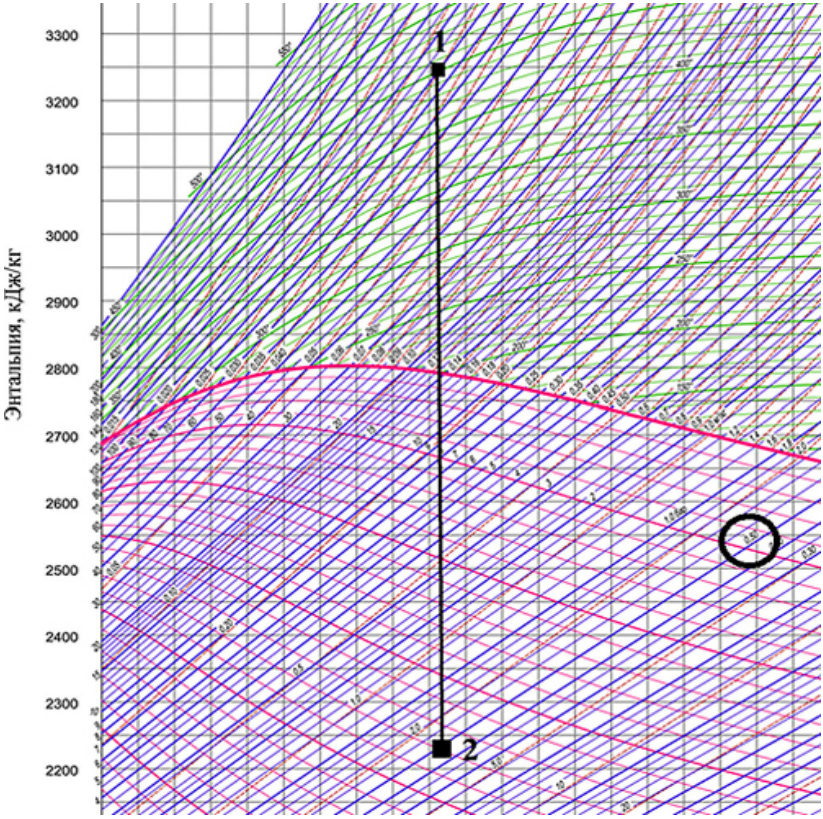


Рис. 2 – Фрагмент h-s диаграммы: нахождение точки 2

Получена точка 2. Через эту точку проходит изобара. Она соответствует давлению 0,5 бар. Энтропия у нас не изменилась, так как процесс адиабатный, а вот энтальпия стала равна h = 2230 кДж/кг.

Задача 3

Параметры пара перед паровой турбиной: p_1 = 90 бар, t_1 = 500 °С. Давление в конденсаторе p_2 = 0,04 бара.

Определить состояние пара после расширения в турбине, если ее относительный внутренний КПД η_{oi} = 0,84.

Порядок решения. Располагаемый адиабатный перепад теплоты равен:

$$h_o = h_1 - h_2, \text{ êÄæ/êã.}$$

Действительный теплоперепад:

$$h_i = h_o \eta_{oi}, \text{ кДж/кг.}$$

Энтальпия пара за турбиной h_{2d}:

$$h_{2d} = h_1 - h_i, \text{êÄæ/êã.}$$

Проведя в h-s диаграмме линию постоянной энтальпии h_{2d}, находим в пересечении с изобарой p_2 точку 2_d, для которой степень сухости равна x.

Задача 4

На заводской ТЭЦ установлены две паровые турбины с противодавлением мощностью N = 4000 кВт каждая. Весь пар из турбины направляется на производство, откуда он возвращается обратно в котельную в виде конденсата при температуре насыщения.

Турбины работают с полной нагрузкой при следующих параметрах пара: p_1 = 35 бар, t_1 = 435 °С, p_2 = 1,2 бар.

Принимая, что установка работает по циклу Ренкина, определить часовой расход топлива, если КПД котельной $\eta_{ку}$ = 0,84, а теплота сгорания топлива Q_C = 28500 кДж/кг.

Порядок решения. Удельный расход пара d_O равен:

$$d_î = \frac{3600}{h_1 - h_2}, \text{êã/(êÂò·÷),}$$

где энтальпию h_1 и h_2 находим по h-s диаграмме.

Часовой расход пара, потребляемый турбинами:

$$D_{\text{î}} = 2Nd_{\text{î}}\ ,\text{êã/÷}.$$

Количество теплоты, потребляемой производством:

$$Q_{\text{ï Ð}} = D_{\text{î}}\ \left(h_2 - h_{\text{ï Â}}\right),\text{êÄæ/÷},$$

где $h_{\text{ПВ}} = c_p t_{\text{Н}}$, а $t_{\text{Н}} = f(p_2)$.

Количество теплоты, сообщенной пару в котельной:

$$Q = D_{\text{î}}\ \left(h_1 - h_{\text{ï Â}}\right),\text{êÄæ / ÷}.$$

Часовой расход топлива:

$$B = \frac{Q}{Q_C\ \eta_{\text{ку}}},\text{кг / ч}.$$

Задача 5

Для условий предыдущей задачи подсчитать расход топлива в случае, если вместо комбинированной выработки электрической и тепловой энергии на ТЭЦ будет осуществлена раздельная выработка электроэнергии в конденсационной установке и теплоты в котельной низкого давления.

Конечное давление пара в конденсационной установке принять $p_2 = 0{,}04$ бар. КПД котельной низкого давления принять тот же, что для котельной высокого давления, $\eta_{\text{ку}} = 0{,}84$.

Определить для обоих случаев коэффициент использования теплоты.

Порядок решения. Удельный расход пара на турбину:

$$d_{\text{î}} = \frac{3600}{h_1 - h_2},\text{êã/(êÂò}\cdot\text{÷)},$$

где h_l, h_2 находим по h-s диаграмме.

Полный расход пара на турбину:

$$D_{\text{î}} = 2Nd_{\text{î}}\ ,\ \text{êã / ÷}.$$

Количество теплоты, сообщенной пару в котельной:

$$Q = D_{\hat{i}}\ \left(h_1 - h_{\ddot{i}\ \hat{A}}\right), \hat{e}\ddot{A}\text{æ}/\div,$$

где

$$h_{\ddot{i}\ \hat{A}} = \tilde{n}_{\text{Ð}} \cdot t_{\acute{i}}\ ;$$

$$t_{\acute{i}} = f\left(p_2\right),$$

$$\tilde{n}_{\text{Ð}} = 4{,}19\ \hat{e}\ddot{A}\text{æ}/\left(\hat{e}\tilde{a}\ \hat{E}\right).$$

Расход топлива B_1 в конденсационной установке:

$$B_1 = \frac{Q}{Q_C \cdot \eta_{КУ}},\ \text{кг / ч.}$$

Количество теплоты, потребляемой производством $Q_{ПР}$, принять из задачи 4, следовательно, расход топлива в котельной низкого давления:

$$B_2 = \frac{Q_{ПР}}{Q_C \cdot \eta_{КУ}},\ \text{кг/ч.}$$

Суммарный расход топлива в обеих котельных установках $B_O = B_1 + B_2$, кг/ч.

Экономия топлива на ТЭЦ (при расходе В, см. задачу 4) в сравнении с раздельной выработкой электроэнергии и теплоты составит:

$$\frac{\hat{A}_{\hat{i}} - \hat{A}}{\hat{A}_{\hat{i}}} \cdot 100\%.$$

Коэффициент использования теплоты определяется как отношение всей полезно использованной теплоты ко всей затраченной. Следовательно, в случае комбинированной выработки электроэнергии и теплоты на ТЭЦ:

$$\eta_{ТЭЦ} = \frac{3600 \cdot 2N + Q_{ПР}}{B \cdot Q_C \cdot \eta_{КУ}}.$$

В случае раздельной выработки обоих видов энергии на конденсационной станции и котельной установке:

$$\eta_{кс+ку} = \frac{3600 \cdot 2N + Q_{пр}}{\hat{A}_{\hat{i}}\ \cdot Q_{\tilde{N}} \cdot \eta_{ку}},$$

$$\eta_{кс\ +ку} < \eta_{ÒÝÖ}.$$

Задача 6

Определить плотность теплового потока q, Вт/м^2, проходящего через стенку котла, если толщина ее $\delta_1 = 20$ мм, коэффициент теплопроводности $\lambda_1 = 50$ Вт/(м · К); стенка покрыта слоем накипи толщиной $\delta_2 = 2$ мм, $\lambda_2 = 1$ Вт/(м · К). Температура на поверхности накипи $t_1 = 250$ °С, на наружной поверхности стенки $t_3 = 200$ °С. Найти температуру t_2 в плоскости соприкосновения слоев.

Порядок решения. Плотность теплового потока q равна:

$$q = \frac{t_1 - t_3}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2}}, \text{Вт/м}^2.$$

Температура:

$$t_2 = t_1 - q \cdot \frac{\delta_2}{\lambda_2}.$$

Задача 7

Плоская стальная стенка толщиной $\delta_1 = 10$ мм омывается с одной стороны газами с температурой $t_{ж1} = 310$ °С, а с другой изолирована от окружающего воздуха, имеющего температуру $t_{ж2} = 10$ °С, плотно прилегающей к ней пластиной толщиной $\delta_2 = 15$ мм.

Определить плотность теплового потока и температуры поверхностей стенок, если известно, что коэффициент теплопроводности стали $\lambda_1 = 40$ Вт/(м · К), а материала изоляционной пластины $\lambda_2 = 0{,}15$ Вт/(м · К). Коэффициент теплоотдачи от газов к стенке $\alpha_1 = 25$ Вт/(м^2 · К), а от пластины к воздуху $\alpha_2 = 10$ Вт/(м^2 · К).

Порядок решения. Полное термическое сопротивление плоской многослойной стенки:

$$R = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_2}, (\text{ì}^2 \cdot \hat{\text{E}}) / \hat{\text{B}}\text{ò}.$$

Коэффициент теплопередачи:

$$k = \frac{1}{R}, \hat{\text{A}}\text{ò}/(\text{ì}^2 \cdot \hat{\text{E}}).$$

По уравнению теплопередачи плотность теплового потока:

$$q = k\left(t_{æ1} - t_{æ2}\right), \dot{B}т/ì^2.$$

Температура t_1 на поверхности стальной стенки:

$$t_1 = t_{æ1} - \frac{q}{\alpha_1},$$

на границе между стальной стенкой и изоляционной пластиной:

$$t_2 = t_1 - \frac{\delta_1}{\lambda_1},$$

на поверхности изоляционной пластины:

$$t_3 = t_{æ2} - \frac{q}{\alpha_2}.$$

Задача 8

Через трубу диаметром d = 50 мм и длиной ℓ = 3 м со скоростью w = 0,8 м/с протекает вода. Определить средний коэффициент теплоотдачи, если средняя температура воды $t_ж$ = 50 °С, а температура стенки t_c = 70 °С.

Порядок решения. При $t_ж$ = 50 °С, $\lambda_ж$ = 0,648 Вт/(м К), $\nu_ж = 5{,}56 \cdot 10^{-7}$ м²/с, $Pr_ж$ = 3,54, Pr_c = 2,55 при t_c = 70 °С (табл. П10 приложения).

Рассчитаем число Рейнольдса и определим режим течения воды:

$$Re = \frac{wd}{\nu_ж} = \frac{0{,}8 \cdot 0{,}05}{5{,}56 \cdot 10^{-7}} = 7{,}2 \cdot 10^4 > 10^4,$$

режим турбулентный. В этом случае критериальное уравнение имеет вид:

$$Nu_{d,ж} = 0{,}021 \cdot Re_{d,ж}^{0,8} \cdot Pr_ж^{0,43} \left(\frac{Pr_ж}{Pr_c}\right)^{0,25} \cdot \varepsilon_l =$$

$$= 0{,}021 \cdot \left(7{,}2 \cdot 10^4\right)^{0,8} \cdot 3{,}54^{0,43} \cdot \left(\frac{3{,}54}{2{,}55}\right)^{0,25} \cdot 1$$

$$Nu_{d,æ} = 0{,}021 \cdot 7{,}2 \cdot 10^3 \cdot 1{,}72 \cdot 1{,}09 \cdot 1 = 303$$

$$\mathbf{Nu_{d,ж} = \frac{\alpha d}{\lambda_ж}},$$

$$\alpha = \frac{Nu_{d,ж} \cdot \lambda_{ж}}{d} = 3920, Вт/(м^2 \cdot К)$$

Так как $\frac{\ell}{d} = 60 > 50$, то поправка на влияние длины трубы $\varepsilon_{\ell} = 1$.

Задача 9

Определить, какое количество сухого насыщенного пара давлением 0,198 МПа сконденсируется в стальном горизонтальном трубопроводе диаметром d = 140 мм на длине ℓ = 12 м, если он находится в кирпичном канале a · b = 0,5 · 0,5 м, температура стенок канала t_2 = 20 °С. Коэффициент теплоотдачи при естественной конвенции в канале $\alpha_к$ = 12 Вт/(м² · К).

Порядок решения. Температура пара $t_Н = f(p)$, $t_Н$ = 120 °С; считать температуру стенки паропровода равной $t_Н$, t, = $t_Н$.

Боковые поверхности трубы и канала $F_1 = \pi d\ell$; $F_2 = 2(a+b) \cdot \ell$, м².

Коэффициент лучистого теплообмена $\alpha_л$:

$$\alpha_л = \frac{\varepsilon_{пр} C_o \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right]}{T_1 - T_2}, Вт/(м^2 \cdot К),$$

где $\varepsilon_{пр}$ – приведенная степень черноты системы, C_o = 5,7 Вт/(м² К)

$$\varepsilon_{пр} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{F_1}{F_2}\left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)}$$

ε_1 = 0,7, ε_2 = 0,82.

Суммарный коэффициент теплоотдачи от стального паропровода к воздуху в канале:

$$\alpha = \alpha_л + \alpha_к, Вт/(м^2 \cdot К).$$

Потери теплоты в паропроводе:

$$Q = \alpha F_1 (t_1 - t_2), Вт .$$

Количество конденсируемого пара:

$$D = \frac{Q}{r}, \text{êã/÷},$$

где r, кДж/кг – это скрытая теплота парообразования, которую выбирают по давлению p из табл. 11 приложения.

Задача 10

В теплообменнике $G_2 = 2$ кг/с воды нагреваются от температуры $t'_2 = 20$ °С до $t''_2 = 210$ °С горячими газами, которые при этом охлаждаются от температуры $t'_1 = 410$ °С до температуры $t''_1 = 250$ °С.

Определить поверхность теплообменника при включении его по схеме прямотока и противотока, если коэффициент теплопередачи $k = 32$ Вт/(м^2 · К).

Порядок решения. Количество теплоты, полученное водой от газов, найдем по уравнению теплового баланса:

$$Q = G_2 \cdot C_2 \cdot (t''_2 - t'_2), \text{ Âò}.$$

Среднелогарифмический температурный напор для противотока:

$$\Delta t_л^{прот} = \frac{(t'_1 - t''_2) - (t''_1 - t'_2)}{\ln \frac{(t'_1 - t''_2)}{(t''_1 - t'_2)}}, \text{ град}.$$

Для прямотока:

$$\Delta t_ë^{ïðÿì} = \frac{(t'_1 - t'_2) - (t''_1 - t''_2)}{h \frac{(t'_1 - t'_2)}{(t''_1 - t''_2)}}, \text{ãðàä}.$$

Из уравнения теплопередачи поверхность теплообменника:

$$F_{прям} = \frac{Q}{k\Delta t_л^{прям}}, \text{м}^2,$$

$$F_{прот} = \frac{Q}{k\Delta t_л^{прот}}, \text{м}^2.$$

Задача 11

Для паровой турбины мощностью $N = 1000$ кВт с удельным расходом пара $d_O = 5{,}5$ кг/(кВт · ч) определить поверхность ох-

лаждения конденсатора и расход охлаждающей воды, если известно, что кратность охлаждения m = 55 кг/кг и температура охлаждающей воды на входе в конденсатор t_2 = 18 °С, на выходе t_2 = 28 °С. Температура пара в конденсаторе $t_Н$ = 32,5 °С. Коэффициент теплопередачи k = 3700 Вт/(м^2 • К).

Порядок решения. Расход пара турбиной D = d_0N, т/ч. Расход охлаждающей воды W = Dm, т/ч. Отводимая в конденсаторе теплота Q = c_pW($t_2 - t'_2$), Дж/ч.

Температурный напор в конденсаторе:

$$\Delta t = t_н - \frac{t'_2 + t''_2}{2}, \text{град.}$$

Поверхность охлаждения конденсатора:

$$F = \frac{Q}{k\Delta t}, \text{ì}^2.$$

Задача 12

Определить удельный расход теплоты на выработку 1 МДж электроэнергии (для условного топлива) для КЭС с тремя турбогенераторами мощностью N = 75 • 10^3 кВт каждый и с коэффициентом использования установленной мощности $к_и$ = 0,64, если станция израсходовала B = 670 • 10^6 кг/год каменного угля с низшей теплотой сгорания $Q_н^р$ = 20500 кДж/кг.

Порядок решения. Установленная мощность КЭС:

$$N^{ó}_{ýñ} = 3N, \text{ ê}\hat{A}ò.$$

Количество выработанной энергии за год:

$$Ý^{âûð} = 8760k_u N^{y}_{ýñ}, \text{ êÄæ/ãî ä}.$$

КПД КЭС брутто:

$$\eta^{бр}_{КЭС} = \frac{Э^{выр}}{BQ^р_н}.$$

Удельный расход теплоты на выработку одного МДж электроэнергии (для условного топлива):

$$d^{Э}_{КЭС} = \frac{1}{\eta^{бр}_{КЭС}}, \text{МДж/МДж}.$$

Задача 13

Теплоэлектроцентраль израсходовала $B_{ТЭ}ц = 92 \cdot 10^6$ кг/год каменного угля с низшей теплотой сгорания – 27500 кДж/кг, выработав при этом электроэнергии $Э^{выр} = 64 \cdot 10^{10}$ кДж/год и отпустив теплоты внешним потребителям $Q^{отп} = 4{,}55 \cdot 10^{11}$ кДж/год.

Определить КПД ТЭЦ брутто и нетто по выработке электроэнергии и теплоты, если расход электроэнергии на собственные нужды 6 % от выработанной энергии, КПД котельной установки $\eta_{КУ}$– 0,87 и расход топлива на выработку электроэнергии для собственных нужд $B_{СН} = 4{,}5 \cdot 10^6$ кг/год. Определить удельные расходы условного топлива на выработку 1 МДж электроэнергии и 1 МДж теплоты.

Порядок решения. Расход топлива на выработку отпущенной теплоты:

$$B_Q = \frac{Q^{отп}}{Q^p_н \eta_{КУ}}, \text{ кг/год.}$$

Расход топлива на выработку электроэнергии:

$$\hat{A}_ý = \hat{A}_{ÒÝÖ} - \hat{A}_Q, ê\tilde{a}/\tilde{a}î\ ä.$$

КПД ТЭЦ брутто по выработке электроэнергии:

$$\eta^{Эбр}_{ТЭЦ} = \frac{Э^{выр}}{B_э Q^p_н}.$$

КПД ТЭЦ брутто по выработке теплоты:

$$\eta^{Обр}_{ТЭЦ} = \frac{Q^{отп}}{B_Q Q^p_н}.$$

Количество отпущенной электроэнергии КПД ТЭЦ нетто по отпуску электроэнергии:

$$Ý^{î\ òï} = Ý^{âû\ ð} - Ý^{ñ.í.};$$

$$Ý^{ñ.í.} = Ý^{âû\ ð} \cdot 0{,}06, ê\ÄÆ/\tilde{a}î\ ä.$$

КПД ТЭЦ нетто по отпуску электроэнергии:

$$\eta_{\text{ТЭЦ}}^{\text{Энетто}} = \frac{Э^{\text{отп}}}{(B_{Э} - B_{\text{СН}})Q_{\text{н}}^{\text{р}}}.$$

КПД ТЭЦ нетто по отпуску теплоты:

$$\eta_{\text{ТЭЦ}}^{\text{Q нетто}} = \frac{Q^{\text{отп}}}{(B_{Q} - B_{\text{СН}})Q_{\text{н}}^{\text{р}}}.$$

Удельный расход условного топлива на выработку 1 МДж электроэнергии:

$$b_{\text{ОУЭ}}^{\text{Э}_{\text{у}}} = \frac{\hat{A}_{Э} Q_{\text{í}}^{\text{ð}}}{29{,}3 Э^{\text{âû ð}}}, \text{ êã/Ì Äæ}.$$

Удельный расход условного топлива на выработку 1 МДж теплоты:

$$b_{\text{ОУЭ}}^{\text{Q}_{\text{ô}}} = \frac{\hat{A}_{Q} Q_{\text{í}}^{\text{ð}}}{29{,}3 Q^{\text{î ôï}}}, \text{ êã/Ì Äæ}.$$

Задача 14 (многовариантная)

Определить мощность малой ГЭС, если расход воды Q, напор *H*. Коэффициент потерь напора в открытом гидроканале *K* = 0,85, КПД гидротурбины $\eta_{Т}$, КПД гидрогенератора $\eta_{Э}$. Как изменится мощность, если затвором уменьшить расход воды до 70 % от номинального? Будет она больше или меньше, чем 70 % от номинальной мощности?

Исходные данные принять по таблице 1. Вариант выбрать по начальной букве фамилии.

Таблица 1 – Исходные данные

Вариант	Q, м³/с	H, м	$\eta_{Т}$, %	$\eta_{Э}$, %
А К Ф	10	17	76	94
Б Л Х	12	15	78	95
В М Ч	14	13	79	96
Г Н Ц	16	11	80	93
Д О Ш	18	9	81	94
Е П Щ	20	8	82	95
Ё Р Ы	22	7	83	95
Ж С Э	24	6	84	96
З Т Ю	26	7	85	95
И У Я	28	8	84	96

Порядок решения. Электрическая мощность гидроэнергетической установки рассчитывается по формуле:

$$N = K \cdot \eta_T \cdot \eta_Э \cdot \rho \cdot g \cdot H \cdot V, \text{ Вт}$$

где К – коэффициент потерь напора в гидроканале,

η_T – КПД гидротурбины (изменяется в пределах 0,7... 0,88),

$\eta_Э$ – КПД гидрогенератора (в пределах 0,9 ... 0,96),

ρ = 1000 кг/м – плотность воды,

g = 9,81 м/с – ускорение силы тяжести,

Н – напор (разность уровней воды верхнего и нижнего бьефов), м,

V – расход воды, $м^3/с$.

Задача 15 (многовариантная)

Определить мощность ветровой электростанции, содержащей n однотипных ветроэнергетических установок. Длина лопасти ветроколеса L, скорость ветра U, КПД ветродвигателя $\eta_В$, электрический КПД установки (генератора и преобразователя) $\eta_Э$, температура воздуха t, атмосферное давление р.

Исходные данные принять по таблице 2. Вариант выбрать по начальной букве имени.

Таблица 2 – Исходные данные

Вариант	n, шт.	L , м	U, м/с	$\eta_В$, %	$\eta_Э$, %	t, °С	р, кПа
А К Ф	16	5	12	25	70	-20	100
Б Л Х	15	7	11	32	74	-15	101
В М Ч	14	9	10	29	82	-10	102
Г Н Ц	13	11	9	34	71	-5	101
Д О Ш	12	13	12	26	72	0	100
Е П Щ	11	6	14	32	83	5	99
Ё Р Ы	10	9	16	28	76	10	98
Ж С Э	9	7	18	30	73	15	97
З Т Ю	8	15	20	27	78	20	99
И У Я	7	10	18	35	80	25	101

Порядок решения. Ветровой поток, проходящий через площадь F, ометаемую лопастями ветродвигателя, имеет энергию:

$$E = \frac{m \cdot U^2}{2}, \text{ Äæ},$$

где U – скорость ветра, м/с,
m – масса воздуха.

За секунду через площадь F протекает:

$$m = \rho \cdot U \cdot F, \text{ кг/с},$$

где $\rho = p / RT$ – плотность воздуха, кг/м,
p – атмосферное давление, Па,
R = 287 Дж/кг – универсальная газовая постоянная;
T – абсолютная температура, К.

Площадь F определяется через длину лопасти L ветроколеса:

$$F = \pi \cdot L^2, \text{ м}^2$$

Соответственно электрическая мощность N, развиваемая ВЭУ, определяется формулой:

$$N = \eta_В \cdot \eta_Э \cdot \rho \cdot \pi \cdot L^2 \cdot \frac{U^3}{2} \cdot n, \text{ Вт}$$

где $\eta_В$ – КПД ветродвигателя,
$\eta_Э$ – электрический КПД ветрогенератора и преобразователя.

Задача 16 (многовариантная)

Определить теплоту, подводимую гелиостатами к установленному на башне парогенератору паротурбинной солнечной электростанции, если количество гелиостатов n, площадь зеркал одного гелиостата F, интенсивность солнечного излучения I, коэффициент эффективности использования солнечного излучения $\eta_{И.}$ Определить также термический КПД и теоретическую мощность паротурбинной установки СЭС, работающей по циклу Ренкина, если параметры острого пара p_1, t_1, а давление в конденсаторе p_2 = 10 кПа и КПД парогенератора $\eta_{ПГ}$ = 0,85. Как изменится мощность СЭС, если вместо паротурбинной установки применить кремниевые фотоэлектрические преобразователи с КПД $\eta_{ФЭ}$ = 0,15, занимающие ту же площадь, что и зеркала гелиостатов?

Исходные данные принять по таблице 3. Вариант выбрать по начальной букве фамилии.

Таблица 3 – Исходные данные

Вариант	n, шт.	F, м²	I, Вт/м²	$\eta_и$, %	p_1, МПа	t_1, °С
А К Ф	1000	10	350	50	12	450
Б Л Х	3000	12	400	48	11	440
В М Ч	5000	14	450	46	10	430
Г Н Ц	7000	13	500	47	9	420
Д О Ш	8000	12	550	49	8	410
Е П Щ	9000	11	600	50	9	400
Ё Р Ы	10000	12	650	51	10	410
Ж С Э	11000	13	700	50	11	420
З Т Ю	12000	14	750	49	12	430
И У Я	13000	15	800	48	9	440

Порядок решения. В паротурбинных солнечных энергетических установках теплота солнечного излучения от зеркал гелиостатов концентрируется на парогенераторе, установленном на башне. Общее количество теплоты, воспринятой парогенератором, составляет:

$$Q = \eta_и \cdot n \cdot F \cdot I, Вт,$$

где $\eta_и$ – коэффициент эффективности использования солнечного излучения (изменяется в пределах 0,35...0,5),

n – количество гелиостатов,

F – площадь зеркал одного гелиостата, м²,

I – интенсивность солнечного излучения, Вт/м.

Работа килограмма пара паротурбинной установки в цикле Ренкина равна:

$$W = h_1 - h_2, \hat{e}Äæ/\hat{e}ã.$$

Термический КПД:

$$\eta_t = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_к}$$

где h_1 – энтальпия острого пара,

h_2 – энтальпия отработавшего в турбине пара (определяются по h-s диаграмме водяного пара),

$h_к$ – энтальпия конденсата (определяется по таблицам термодинамических свойств воды и водяного пара).

Теоретическая мощность паротурбинной СЭУ составит:

$$N_{ПТ} = \eta_t \cdot \eta_Э \cdot Q, Вт, Вт,$$

где $\eta_Э$ – КПД электрогенератора (в пределах 0,92…0,96).

Мощность СЭУ с фотоэлектрическими преобразователями определяется соотношением:

$$N_{ФЭ} = \eta_{ФЭ} \cdot F_{ФЭ} \cdot I, Вт, Вт,$$

где $\eta_{ФЭ}$ – КПД фотоэлектрических преобразователей (изменяется в пределах 0,13...0,18),

$F_{ФЭ}$ – общая площадь фотоэлектрических преобразователей, $м^2$.

Задача 17 (многовариантная)

Двухконтурная пароводяная геотермальная электростанция с электрической мощностью N получает теплоту от воды из геотермальных скважин с температурой $t_{ГВ}$. Сухой насыщенный пар на выходе из парогенератора имеет температуру на 20 °С ниже, чем $t_{ГВ}$. Пар расширяется в турбине и поступает в конденсатор, где охлаждается водой из окружающей среды с температурой $t_{ХВ}$. Охлаждающая вода нагревается в конденсаторе на 12 °С. Конденсат имеет температуру на 20 °С выше, чем $t_{ХВ}$. Геотермальная вода выходит из парогенерирующей установки с температурой на 15 °С выше, чем конденсат. Относительный внутренний коэффициент турбины η_{Oi}, электрический КПД турбогенератора $\eta_Э = 0,96$. Определить термический КПД цикла Ренкина, расход пара и удельный расход теплоты, расходы воды из геотермальных скважин и из окружающей среды.

Исходные данные принять по таблице 4. Вариант выбрать по начальной букве имени.

Таблица 4 – Исходные данные

Вариант	**N, МВт**	**$t_{гв}$, °С**	**$t_{хв}$, °С**	**η_{Oi}, %**
А К Ф	4	190	5	78
Б Л Х	5	200	10	80
В М Ч	6	210	15	82
Г Н Ц	7	220	20	80
Д О Ш	8	230	15	78
Е П Щ	9	240	10	79
Ё Р Ы	10	245	5	81

Вариант	N, МВт	$t_{ГВ}$, °С	$t_{ХВ}$, °С	η_{Oi}, %
Ж С Э	11	255	10	80
З Т Ю	12	235	15	82
И У Я	13	240	20	81

Порядок решения. В одноконтурной паротурбинной ГеоТЭУ энтальпия сухого насыщенного пара после сепарации определяется по температуре геотермальной воды $t_{ГВ}$ из таблиц термодинамических свойств воды и водяного пара или h-s диаграммы. В случае двухконтурной ГеоТЭУ учитывается перепад температур в парогенераторе Δt. В остальном расчет ведется как и для солнечной паротурбинной ТЭС.

Расход пара определяется из соотношения:

$$G_{П}= \frac{N}{(h_1 - h_2)\cdot \eta_t \cdot \eta_{Oi} \cdot \eta_{Э}}, кг/с,$$

где η_t – термический КПД цикла,

η_{Oi} – относительный внутренний КПД турбины,

$\eta_{Э}$ – электрический КПД турбогенератора,

N – мощность ГеоТЭУ, Вт.

Расход горячей воды из геотермальных скважин определяется из формулы:

$$G_{ГВ}= \frac{N}{c_P \cdot \Delta t_{ГВ} \cdot \eta_t \cdot \eta_{Oi} \cdot \eta_{Э} \cdot \eta_{ПГ}}, кг/с,$$

где $\Delta t_{ГВ}$ – перепад температур геотермальной воды в парогенераторе, °С,

$\eta_{ПГ}$ – КПД парогенератора.

Расход холодной воды из окружающей среды на конденсацию пара:

$$G_{ХВ}= \frac{G_{П}(h_2 - h_К)}{c_P \cdot \Delta t_{ХВ}}, кг/с,$$

где c_P = 4,19 кДж/(кг · К) – удельная теплоемкость воды,

$\Delta t_{ХВ}$ – перепад температур холодной воды в конденсаторе, °С.

Расчет ГеоТЭУ с низкокипящими и смесевыми рабочими телами производится с использованием таблиц термодинамических свойств и h-s диаграмм паров этих жидкостей.

3. РАБОЧАЯ ПРОГРАММА

3.1. Содержание дисциплины

Тема 1. Электроэнергетика

Общие сведения. Топливо-энергетический комплекс (ТЭК) России. Энергетическая политика России. Энергоресурсы. Органическое топливо: состав и характеристики. Неорганическое топливо. Ядерное топливо. Возобновляемые и невозобновляемые источники энергии.

Тема 2. Основы технической термодинамики

Основные понятия термодинамики. Первый закон термодинамики. Второй закон термодинамики. Термодинамические свойства и процессы реальных газов и паров. Циклы энергетических установок. Цикл Карно.

Политропные процессы. Основные характеристики политропных процессов. Изображение в координатах PV и TS. Основные термодинамические процессы: изохорный, изобарный, изотермический и адиабатный как частные случаи политропного процесса. Термодинамические процессы в реальных газах и парах. Свойства реальных газов. Пары. Основные определения. Процессы парообразования в PV и TS координатах. Водяной пар. Понятие об уравнении Вукаловича-Новикова. Уравнение Боголюбова-Майера. Термодинамические таблицы воды и водяного пара, PV, TS, HS, диаграммы водяного пара. Расчет термодинамических процессов водяного пара с помощью таблиц и HS-диаграммы.

Теплообмен. Теплопроводность. Конвективный теплообмен. Теплообмен излучением. Теплопередача. Сложный теплообмен. Основы расчетов теплообменных аппаратов.

Принцип действия поршневых ДВС. Циклы с изохорным и изобарным подводом теплоты. Цикл со смешанным подводом теплоты. Изображение циклов в PV и TS диаграммах. Термодинамические и энергетические КПД циклов ДВС. Сравни-

тельный анализ термодинамических циклов ДВС.

Принципиальная схема паросиловой установки. Цикл Ренкина и его исследование. Влияние начальных и конечных параметров на термический КПД цикла Ренкина. Изображение цикла в PV, TS и HS диаграммах. Пути повышения экономичности паросиловых установок. Теплофикационный цикл. Понятие о циклах атомных силовых установок. Энергетический анализ циклов паросиловых установок.

Принцип действия ГТУ. Цикл ГТУ с изобарным подводом теплоты. Цикл ГТУ с изохорным подводом теплоты. Регенеративные циклы. Изображение циклов в PV и TS диаграммах. Термические и энергетические КПД ГТУ.

Тема 3. Тепловая электроэнергетика

Типы тепловых электростанций (ТЭС): конденсационные (КЭС, ГРЭС) и теплоэлектроцентрали (ТЭЦ). Простейшие принципиальные тепловые схемы электростанций. Суточные и годовые графики тепловых и электрических нагрузок; выбор электростанций для их покрытия. Потери и КПД тепловых электростанций на органическом топливе. Показатели тепловой экономичности теплоэлектроцентралей (ТЭЦ). Условия применимости схем раздельного и комбинированного энергоснабжения. Теплоснабжение.

Схемы отпуска от ТЭЦ пара и сетевой воды внешним потребителям. Основное энергетическое оборудование тепловых электростанций. Вспомогательное оборудование тепловых электростанций.

Газотурбинные и парогазовые установки ТЭС. Когенерация. Повышение экономичности комбинированных установок.

Дизельные электростанции.

Охрана окружающей среды от воздействия тепловых электростанций.

Тема 4. Атомные электрические станции

Понятие о ядерных цепных реакциях. Основы физического расчета ядерного реактора. Глубина выгорания ядерного топлива.

Тепловые схемы АЭС: одноконтурная, двухконтурная и трехконтурная.

Основное энергетическое оборудование АЭС: атомные реакторы типа РБМК, ВВЭР и БН; основные отличия и особенности этих типов энергетических реакторов. Реакторные установки двухконтурных АЭС. Высокотемпературные газоохлаждаемые реакторы (ВТГР). Основы теплового расчета парогенератора с водо-водяным энергетическим реактором.

Атомные станции теплоснабжения (АСТ); реакторные установки для АСТ. Атомные теплоэлектроцентрали (АТЭЦ).

Особенности паротурбинного цикла АЭС.

Тема 5. Гидроэнергетика

Основы гидроэнергетики: основные характеристики потока воды; уравнение неразрывности потока жидкости; уравнение Бернулли; гидродинамический напор, гидравлическое сопротивление и потеря напора жидкости.

Основные гидрологические характеристики рек: расход воды, норма и модуль стока, работа водяного потока.

Классификация гидравлических турбин для гидроэлектростанций (ГЭС): активные и реактивные гидротурбины; энергетические характеристики гидротурбин.

Состав и компоновка основных сооружений ГЭС. Каскадное и комплексное использование водных ресурсов. Регулирование речного стока. Проектирование и эксплуатация гидроэнергетических установок.

Гидроэнергетика малых гидроэлектростанций: ГЭС русловые, приплотинные; гидроаккумулирующие электростанции (ГАЭС); приливные электростанции (ПЭС); волновые энергоустановки.

Решение экологических проблем при комплексном использовании водных ресурсов.

Тема 6. Оборудование производства и передачи электрической энергии

Основные понятия и определения. Исторический обзор

производства и передачи электрической энергии в России. Преимущества объединенных электроэнергетических систем. Классификация электрических сетей. Номинальные напряжения электрических сетей. Требования, предъявляемые к электрическим сетям при их проектировании, сооружении и эксплуатации. Рабочие режимы работы электрических сетей.

Основы процесса производства электрической энергии.

Основные элементы электроэнергетических систем: генераторы, линии электропередачи, трансформаторы и автотрансформаторы, узлы комплексных нагрузок.

Основные сведения о конструкции воздушных линий. Конструктивные элементы воздушных линий: провода и тросы, изоляторы, линейная арматура, опоры и основания.

Основные сведения о конструкциях кабельных электрических линий. Конструкции силовых кабелей.

Тема 7. Возобновляемая энергетика

Солнечные энергетические установки. Преобразование солнечной энергии в другие виды энергии: теплоту и электричество.

Излучение, плотность потока излучения, спектральная плотность потока излучения. Составляющие излучения. Тепловой баланс Земли. Сезонные, суточные и погодные изменения облученности. Ориентация приемной площадки относительно солнца (угол наклона, азимут и угол падения, их влияние на облученность приемника). Башенные солнечные электростанции. Оценка кратности концентрации солнечного излучения. Электростанции с солнечными прудами. Солнечные коллекторы и солнечные фотоэлектрические установки (СФЭУ). КПД солнечных установок.

Энергия воздушного потока и мощность ВЭУ. Основные типы ВЭУ. Классификация ветроустановок. Иншорные и офшорные ветропарки; ветроэнергетика в системах электроснабжения.

Принципы преобразования ветровой энергии. Принципиальные конструкции ветровых турбин. Основные узлы

ветроэнергетических установок. Повторяемость скорости ветра и распределение годовой удельной энергии ветра. Коэффициент торможения воздушного потока, коэффициент мощности ветроколеса (критерий Жуковского-Бетца). Зависимость коэффициента мощности ветроколеса от коэффициента торможения потока. Лобовое давление на ветроколесо и коэффициент лобового давления. Крутящий момент ветроколеса и коэффициент крутящего момента ветроколеса. Коэффициент быстроходности ветроколеса и зависимость от него коэффициента крутящего момента и коэффициента мощности (для ветроколес с высоким и низким геометрическим заполнением). Взаимосвязь сечений воздушного потока через ветроколесо. Векторы аэродинамических сил и скоростей в сечении лопасти. Зависимость режимов ветроустановок по мощности от скорости ветра и от числа оборотов ветроколеса.

Энергия волн. Волновое движение. Энергия и мощность волн. Устройства для преобразования энергии волн.

Энергия тепла океана. Использование низкопотенциальной тепловой энергии. Оценка эффективности электростанции с использованием тепловой энергии океана.

Энергия приливов. Причины возникновения приливов. Усиление приливов. Энергия приливов. Мощность приливных течений. Мощность подъема воды. Сизигийные и квадратурные приливы. Принцип действия и график выдаваемой мощности приливной электростанцией.

Геотермальная энергия. Характерные зоны и основные места концентрации геотермальной энергии Земли. Использование геотермальных ресурсов.

Тема 8. Проблемы и перспективы электроэнергетики

Основы энерготехнологии. Вторичные энергоресурсы (ВЭР). Классификация ВЭР и направления их использования. Утилизационные энергетические установки. Ресурсосберегающие технологии. Энергосбережение. Основные направления рационального использования энергии.

3.2. Место дисциплины в структуре основной образовательной программы

Дисциплина относится к профессиональному циклу базовой части модуля «Электроэнергетика»; профили – «Электроснабжение», «Электроэнергетические системы и сети».

Указанная дисциплина является одной из профилирующих; имеет как самостоятельное значение, так и является базой для ряда специальных дисциплин.

Базовый учебный план приема утвержден 29.06.2011 г. Обучение очной формы предусмотрено на втором курсе в третьем семестре. Общая трудоемкость дисциплины составляет три зачетных единицы, 72 часа.

Пререквизиты – «Введение в профессию», «Энергосбережение», «История энергетики России», «Энергетические системы России».

Кореквизиты – «Электрические станции и подстанции», «Электроэнергетические системы и сети», «Электроэнергетика».

Форма обучения – очная, заочная.

Вид промежуточной аттестации – зачет.

Обеспечивающее подразделение – кафедра электроэнергетики.

В процессе освоения дисциплины у студентов развиваются следующие компетенции.

1. Общекультурные:

• способность к обобщению, анализу, восприятию информации, постановке цели и выбору путей ее достижения (ОК-1);

• способность к письменной и устной коммуникации на государственном языке: умение логически верно, аргументированно и ясно строить устную и письменную речь; готовность к использованию одного из иностранных языков (ОК-2);

• готовность к кооперации с коллегами, работе в коллективе (ОК-3).

2. Профессиональные:

• способность рассчитывать схемы и элементы основного оборудования, вторичных цепей, устройств защиты и автоматики электроэнергетических объектов (ПК-15);

• способность рассчитывать режимы работы электроэнер-

гетических установок различного назначения, определять состав оборудования и его параметры, схемы электроэнергетических объектов (ПК-16).

Обучающиеся должны освоить дисциплину на уровне, позволяющем им рассчитывать схемы и элементы основного оборудования, вторичных цепей, устройств защиты и автоматики электроэнергетических объектов.

В соответствии с поставленными целями в результате освоения дисциплины студент должен:

знать:

– типы электростанций и особенности их технологического цикла для задач производства тепловой и электрической энергии;

– принципы выполнения работы основного теплотехнического и электрического оборудования электростанций;

– принципы построения и эксплуатации систем передачи и распределения электрической энергии;

уметь:

– анализировать структуру затрат на производство электрической и тепловой энергии;

– использовать методы оценки основных видов энергоресурсов и преобразования их в электрическую и тепловую энергию;

владеть:

– анализом технологических схем производства электрической и тепловой энергии.

Таблица 5 – Общий временной ресурс обучения

Виды учебной деятельности	**Очная форма обучения**	**Заочная форма обучения**
Лекции	18 час.	4
Лабораторные занятия		
Практические занятия	18 час.	4
Всего аудиторных занятий	36 час.	
Самостоятельная работа	36 час.	64
Общая трудоемкость	72 час.	72

Таблица 6 – Структура содержания дисциплины для студентов очной формы обучения

Название разделов	Аудиторная работа (час.)		Самостоятельная работа (час.)	Итого (час.)
	лекции	практич. занятия		
Электроэнергетика	2	2	4	8
Основы технической термодинамики	2	2	6	10
Тепловая электроэнергетика	2	2	4	8
Атомные электрические станции	2	2	4	8
Гидроэнергетика	2	2	4	8
Оборудование производства и передачи электрической энергии	2	2	4	8
Возобновляемая энергетика	4	4	6	14
Проблемы и перспективы электроэнергетики	2	2	4	8
Всего:	18	18	36	72

Таблица 7 – Структура содержания дисциплины для студентов заочной формы обучения

Название разделов	Аудиторная работа (час.)		Самостоятельная работа (час.)	Итого (час.)
	лекции	практич. занятия		
Электроэнергетика	1		8	9
Основы технической термодинамики	1	2	6	9
Тепловая электроэнергетика		2	7	9
Атомные электрические станции			9	9
Гидроэнергетика			9	9
Оборудование производства и передачи электрической энергии			9	9
Возобновляемая энергетика	1		8	9
Проблемы и перспективы электроэнергетики	1		8	9
Всего:	4	4	64	72

4. ПРИМЕРНОЕ ТЕСТОВОЕ ЗАДАНИЕ

1. Как изменяется термический КПД цикла Ренкина при повышении давления в конденсаторе?

а) не изменяется;
б) колеблется около некоторого среднего значения;
в) увеличивается;
г) уменьшается.

2. Как определяют параметры водяного пара?

а) по уравнению состояния Клапейрона-Менделеева;
б) по критическим параметрам;
в) по степени сухости;
г) по таблицам и диаграммам водяного пара.

3. Какую выгоду дает применение ПСУ с комбинированной выработкой электрической и тепловой энергии (на ТЭЦ)?

а) возможность использовать более дешевое топливо;
б) повышение степени использования теплоты;
в) уменьшение затрат на оборудование;
г) упрощение обслуживания.

4. Почему цикл Карно называют циклом идеальной тепловой машины?

а) машина, работающая по циклу Карно, не загрязняет окружающую среду;
б) цикл Карно обеспечивает наивысший термический КПД при заданных температурах подвода и отвода теплоты;
в) при совершении цикла Карно параметры рабочего тела возвращаются к исходным значениям;
г) машина, работающая по циклу Карно, имеет наименьшие массу и габариты.

5. В чем преимущество дизельного двигателя перед ГТУ?

а) у дизеля выше КПД;
б) дешевле изготовление;
в) дешевле топливо;
г) проще в обслуживании.

6. Что дает применение парогазовой установки по срав-

нению с раздельным использованием ПСУ и ГТУ?

а) возможность использовать более дешевое топливо;

б) повышение общего КПД установки;

в) уменьшение вредных выбросов в атмосферу;

г) снижение затрат на оборудование.

7. Почему термический КПД атомных ПСУ ниже, чем в установках на органическом топливе?

а) в атомных установках острый пар насыщенный, с более низкими параметрами;

б) выше давление в конденсаторе;

в) больше затрачивается энергии на собственные нужды;

г) турбины имеют меньше ступеней.

8. Какие энергетические установки производят большую часть электрической энергии на ТЭС России?

а) газотурбинные;

б) паротурбинные;

в) гидротурбинные;

г) турбины Ренкина.

9. При расширении пара в многоступенчатых турбинах удельный объем его от ступени к ступени…

а) уменьшается;

б) все ответы верны;

в) возрастает;

г) остается неизменным.

10. Турбины, в которых весь располагаемый теплоперепад преобразуется в кинетическую энергию потока в соплах, а в каналах между рабочими лопатками расширения не происходит (давление рабочего тела не меняется), – ...

а) многоступенчатые турбины;

б) активные турбины;

в) одноступенчатые турбины;

г) реактивные турбины.

11. Котлы с многократной принудительной циркуляцией – это котлы, в которых...

а) движение воды и пароводяной смеси происходит циклично под насосом и позволяет снизить температуру продуктов сгорания;

б) движение воды и пароводяной смеси в циркуляционном контуре осуществляется принудительно (насосом);

в) движение воды и пароводяной смеси осуществляется циклично и позволяет полнее использовать теплоту сжигаемого топлива;

г) нет верного ответа.

12. Рекомендованное CODATA (Committee on Data for Science and Technology) значение 1 а. е. м. на 2006 год составляет:

а) $\approx 1{,}36 \times 10^{-27}$ кг;

б) $\approx 1{,}46 \times 10^{-27}$ кг;

в) $\approx 1{,}56 \times 10^{-27}$ кг;

г) $\approx 1{,}66 \times 10^{-27}$ кг.

13. Какие турбины в начале XXI века установлены на Южно-Сахалинской ТЭЦ?

а) паровые;

б) гидравлические;

в) транспортные;

г) газовые.

14. Для изохорного процесса:

а) показатель политропы равен 1;

б) показатель политропы равен 0;

в) показатель политропы равен k;

г) показатель политропы равен $\pm\infty$.

15. Атомная станция типа АСТ вырабатывает:

а) электроэнергию и тепло;

б) только электроэнергию;

в) только тепло;

г) электроэнергию на основе реактора, работающего на Тории.

16. На АЭС электроэнергия вырабатывается посредством...

а) электромашинных генераторов, приводимых во вращение паровыми турбинами;

б) графитовых реакторов;

в) деления изотопов урана или плутония в ходе управляемой цепной реакции, протекающей в ядерном реакторе;

г) поглощения нейтронами ядер атомов уранового топлива.

17. По каким признакам разделяют электрические станции?

а) по виду электрического двигателя;
б) по виду используемой энергии;
в) по виду отпускаемой энергии;
г) по виду теплового двигателя.

18. Общее название для протонов и нейтронов – …

а) нейтроны;
б) нуклоны;
в) дальтон;
г) нуклид.

19. Термодинамическую систему, которая не обменивается с окружающей средой теплотой,...

а) называют изолированной;
б) называют закрытой;
в) называют адиабатной;
г) называют аденомной.

20. Работа турбины как теплового двигателя характеризуется...

а) эффективной (на валу) мощностью;
б) внешней (индикаторной) мощностью;
в) внутренней (индикаторной) мощностью;
г) нет верного ответа.

21. Уравнение состояния идеального газа:

а) справедливо для открытой термодинамической системы;
б) справедливо для равновесной обратимой термодинамической системы;
в) справедливо для обратимой термодинамической системы;
г) справедливо для равновесной изолированной системы.

22. Минимальная энергия, которую необходимо затратить для полного расщепления ядра на отдельные частицы, рассчитывается по формуле…

а) $E_{св} = (Qm_p - Pm_n + M_я)c^2$;
б) $E_{св} = (Qm_p + Pm_n - M_я)c^2$;
в) $E_{св} = (Zm_p - Nm_n + M_я)c^2$;
г) $E_{св} = (Zm_p + Nm_n - M_я)c^2$.

23. В двигателе внутреннего сгорания рабочим телом...

а) является поршень или турбина;

б) является топливо;

в) является смесь воздуха с отработанными газами топлива;

г) является смесь кислорода с отработанными газами топлива.

24. Атомная единица массы выражается через массу нуклида _____ и равна 1/12 массы этого нуклида:

а) кислорода ^{12}O;

б) кремния ^{12}Si;

в) азота ^{12}N;

г) углерода ^{12}C.

25. Нижнюю трапециевидную часть топки котельного агрегата называют:

а) холодной воронкой;

б) воздухоподогревателем;

в) экономайзером;

г) горячей воронкой.

26. _____ – это внесистемная единица массы, применяемая для масс молекул, атомов, атомных ядер и элементарных частиц:

а) клайперон;

б) дальтон;

в) нейрон;

г) нуклон.

27. Первая модель двигателя, использующего реактивную силу, была построена…

а) Вольтом;

б) Лавалем;

в) Героном;

г) Тесла.

28. Силы, удерживающие нуклоны в ядре, называются...

а) молекулярными;

б) ядерными;

в) кулоновскими;

г) межатомными.

29. Образование всего 1 г гелия сопровождается выделением энергии порядка 10^{12} Дж. Примерно такая же энергия выделяется при сгорании _____ каменного угля:

а) ручной тележки;
б) автосамосвала;
в) железнодорожного вагона;
г) железнодорожного состава.

30. Что такое термический КПД теплового двигателя?

а) отношение низшей температуры цикла к наивысшей;
б) отношение работы цикла к подведенной теплоте;
в) отношение отведенной теплоты к подведенной;
г) отношение снимаемой с двигателя мощности к теоретической.

31. Биологическим вариантом гелиоэнергетики является:

а) использование зеркал для концентрации солнечного света;
б) использование фотохимических элементов;
в) использование солнечных коллекторов;
г) сжигание биомассы.

32. Как изменяется термический КПД цикла Ренкина при повышении давления в конденсаторе?

а) не изменяется;
б) колеблется около некоторого среднего значения;
в) увеличивается;
г) уменьшается.

33. Какая из стран получает наибольший процент электроэнергии из возобновляемых источников?

а) Исландия;
б) Норвегия;
в) Парагвай;
г) США.

34. Что такое степень сухости «х» водяного пара?

а) отношение массы паровой фракции к массе жидкой фракции;
б) отношение массы паровой фракции к общей массе влажного пара;
в) отношение температуры пара к температуре насыщения;
г) масса паровой фракции в единице объема.

35. Когенерация – комбинированное производство:

а) тепловой энергии;
б) электрической энергии;
в) магнитной энергии;
г) атомной энергии.

5. ТЕМАТИКА ПРЕЗЕНТАЦИЙ

1. Активные паровые турбины. Реактивные паровые турбины. Мощность и КПД.
2. Атомные электрические станции (АЭС), общие положения, циклы АЭС и их эффективность; трехконтурные паротурбинные АЭС.
3. Атомные электростанции, типы ядерных реакторов, технологическая схема АЭС.
4. АЭС с канальными водографитовыми кипящими реакторами. АЭС с реакторами на быстрых нейтронах.
5. Биоэнергетика.
6. Ветровые электростанции.
7. Ветроэнергетика в системах электроснабжения.
8. Водохранилища ГЭС, их влияние на окружающую среду. Регулирование речного стока водохранилищами ГЭС.
9. Водяные экономайзеры: типы, конструкция, особенности теплообмена.
10. Воздухоподогреватели: типы, конструкция, особенности теплообмена.
11. Газотурбинные и парогазовые установки ТЭС.
12. Геотермальные электростанции.
13. Гидроаккумулирующие электростанции, перспективы развития гидроэнергетики.
14. Гидроэлектрические станции.
15. Действие рабочего тела на лопатки турбины. Классификация паровых турбин.
16. Дизельные электростанции.
17. Иншорные и офшорные ветропарки.
18. Источники энергии: классификация источников энергии, характеристика возобновляемых и невозобновляемых источников энергии и их запасы, современные способы получения энергии.
19. Каскадное и комплексное использование водных ресурсов. Каскадное регулирование стока водохранилищами ГЭС.
20. Классификация гидротурбин, классы и системы. Активные гидротурбины.

21. Классификация паровых котлов. Основные характеристики паровых котлов.

22. Классификация электрических станций. Способы производства электрической и тепловой энергии.

23. Конвективный и лучистый теплообмен.

24. Конденсационные устройства паровых турбин.

25. Котельные установки и парогенераторы.

26. Котельные установки ТЭС, общие положения, основные виды котельных агрегатов: энергетические котельные агрегаты, котлы производственных котельных, водогрейные котлы отопительных котельных.

27. Магнитогидродинамические генераторы.

28. Малая энергетика.

29. Накопители энергии.

30. Нетрадиционные возобновляемые источники энергии.

31. Общая характеристика, процесс преобразования гидроэнергии в электрическую на различных типах гидроэнергетических установок, схема создания напора и основное оборудование ГЭС, управление агрегатами ГЭС.

32. Общие сведения и типы электростанций.

33. Основные поверхности нагрева парового котла, назначение.

34. Основные способы организации энергосберегающих технологий. Утилизация вторичных энергоресурсов.

35. Основы ресурсо- и энергосбережения: использование вторичных энергоресурсов.

36. Основы теории теплообмена.

37. Особые схемы использования водных ресурсов. Схемы насосного аккумулирования водной энергии.

38. Паровой котел и его основные элементы. Конструкции паровых котлов.

39. Паровые и газовые турбины.

40. Паровые турбины ТЭС, общие сведения, преобразование энергии в соплах и на рабочих лопатках, внутренние и внешние потери в турбине, КПД.

41. Парогазовые установки. Двухвальные турбогенераторы.

42. Пароперегревательные поверхности нагрева: типы, конструкция, особенности теплообмена.

43. Паротурбинные электрические станции (КЭС и ТЭЦ).

44. Плотины ГЭС, типы и конструкции. Поверхностные затворы ГЭС. Глубинные затворы ГЭС. Здания ГЭС, типы и конструкции.

45. Поверхности нагрева: конструкция, особенности теплообмена.

46. Повышение эффективности использования топливо-энергетических ресурсов.

47. Преобразование солнечной энергии в другие виды энергии – теплоту и электричество.

48. Преобразование энергии: возможности превращения одних видов энергии в другие, основные законы термодинамики, основные свойства теплоты, теоретические основы преобразования энергии в тепловых двигателях.

49. Приливные электрические станции. Волновые электростанции. Малые и микро ГЭС.

50. Принцип работы ядерного энергетического реактора, типы ядерных реакторов. АЭС с водо-водяными энергетическими реакторами.

51. Проблемы современной энергетики: социальные, экономические, экологические аспекты в энергетике.

52. Солнечные электростанции. Термоэлектрические генераторы.

53. Состав и компоновка основных сооружений ГЭС.

54. Способы организации газовоздушного тракта котла.

55. Теоретические, технические и экономические гидроэнергетические ресурсы.

56. Тепловой баланс парового котла. Термодинамический цикл паротурбинных электростанций. Технологическая схема производства пара.

57. Тепловые конденсационные электрические станции. Теплоэлектроцентрали.

58. Тепловые машины. Получение электрической энергии с помощью тепловых машин.

59. Тепловые электростанции: общая характеристика, принципы работы и технологические схемы КЭС и ТЭЦ, паровые котлы и парогенераторы, энергетический баланс ТЭС.

60. Теплопроводность и теплопередача.

61. Термодинамический цикл газотурбинной установки.
62. Термоэмиссионные преобразователи.
63. Термоядерная реакция.
64. Типы гидроэнергетических установок. Напор, расход и мощность гидроэнергетических установок. Основные схемы использования водной энергии.
65. Турборасширительные машины.
66. Экологическая безопасность ТЭС.
67. Энергетические характеристики гидротурбин. Реактивные гидротурбины. Основные элементы проточного тракта реактивных гидротурбин. Кавитация и допустимая высота отсасывания.
68. Энергетический баланс АЭС, воспроизводство ядерного горючего.
69. Энергия воздушного потока и мощность ВЭУ.
70. Энергоресурсы и их использование.

6. КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА

Основные требования к выполнению заданий контрольной работы:

1. При выполнении контрольной работы придерживаться только своего варианта. Работы, выполненные не в соответствии с вариантом, не оцениваются и не засчитываются.

2. Выполняется работа печатным способом на компьютере в редакторе Microsoft Word или адаптированном к нему. Шрифт 14 пт, интервал 1,5. Отступ со всех сторон 20 мм. Редактор формул Microsoft Equation, встроенный в приложение редактора Microsoft Word.

3. Титульный лист оформляется в соответствии с приложением А.

4. Условие задач приводится полностью.

5. При решении задачи вычисляемая величина поясняется текстом, соответствующей формулой, нахождение неизвестной величины представляется в буквенном и числовом выражении.

6. Для всех искомых величин указывается размерность. Результаты решения должны быть представлены в единицах СИ.

7. Вычисления производить при помощи электронной техники с точностью до третьей значащей цифры после запятой (ноль значащей цифрой не является). Рекомендуется использовать редактор Microsoft Excel.

8. Графики должны быть построены с соблюдением масштаба. Рекомендуется использовать редактор Microsoft Excel.

9. При оформлении решения следует придерживаться международных терминов и обозначений, принятых в современной учебной литературе.

10. Если при решении задачи какая-либо справочная величина берется из таблицы, надо назвать источник с указанием страницы (например, табл. 23 [4, с. 245]).

11. Страницы нумеровать обязательно. Нумерация осуществляется по центру внизу страницы.

12. Библиографический список использованных материалов приводится в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5 – 2008.

13. По решению преподавателя текст контрольной работы может быть представлен в печатной и электронной формах.

Задание 1

Рассчитать годовой отпуск теплоты от ТЭЦ отдельно для производственно-технологических и коммунально-бытовых потребителей. Определить сантехническую нагрузку производственно-технологических потребителей. Построить годовой график производственного технологического теплоснабжения. Результаты расчета нагрузок потребителей сетевой воды обобщить в виде графика тепловых нагрузок по продолжительности. На основании расчетов выбрать основное оборудование промышленно-отопительной ТЭЦ (паровые турбины, паровые и водогрейные котлы). Представить тепловую схему ТЭЦ с кратким описанием. Данные для расчета взять из таблиц 8–10.

Обозначения:

– расчетный отпуск производственно-технологического пара за один час ($D_П$);

– давление и температура технологического (свежего) пара ($p_П$) и ($t_П$);

– доля возврата и температура конденсата технологического пара ($\beta_{ОК}$) и ($t_{ОК}$);

– годовое число часов использования производственно-технологической нагрузки по пару ($T_{ТЭЦ}$);

– доля сантехнической нагрузки в горячей воде от расчетного отпуска технологического (производственного) пара ($\gamma_{СТ}$);

– место сооружения ТЭЦ определяется климатическими условиями города;

– численность населения города, присоединенного к ТЭЦ (m);

– вид топлива, сжигаемого на ТЭЦ: уголь или газ;

– низшая теплота сгорания топлива ($Q_Н$).

Таблица 8 – Исходные данные задания 1 (часть А)

Величина	Исходные данные по начальной букве фамилии									
	А К Ф	**Б Л Х**	**В М Ч**	**Г Н Ц**	**Д О Ш**	**Е П Щ**	**Ё Р Ы**	**Ж С Э**	**З Т Ю**	**И У Я**
$D_П$, кг/час	30	50	750	150	700	900	550	350	400	450
$\gamma_{СТ}$	0,16	0,15	0,07	0,13	0,08	0,06	0,05	0,09	0,08	0,07

Продолжение таблицы 8

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Город	Санкт-Петербург	Верхоянск	Москва	Братск	Красноярск	Южно-Сахалинск	Якутск	Архангельск	Волгоград	Иркутск

Таблица 9 – Исходные данные задания 1 (часть Б)

Величина	Исходные данные по начальной букве имени									
	АКФ	**БЛХ**	**ВМЧ**	**ГНЦ**	**ДОШ**	**ЕПЩ**	**ЁРЫ**	**ЖСЭ**	**ЗТЮ**	**ИУЯ**
m, тыс. чел.	100	90	80	70	100	90	80	70	80	90
Топливо	Газ	Уголь	Газ	Уголь	Газ	Уголь	Газ	Уголь	Газ	Уголь
$Q_н$, МДж/кг	48,65	15,91	48,71	16,71	49,01	17,25	49,52	18,92	50,31	20,52

Таблица 10 – Исходные данные задания 1 (часть В)

Величина	Исходные данные по начальной букве отчества *									
	АКФ	**БЛХ**	**ВМЧ**	**ГНЦ**	**ДОШ**	**ЕПЩ**	**ЁРЫ**	**ЖСЭ**	**ЗТЮ**	**ИУЯ**
$p_П$, МПа	1,5	3,5	4,0	3,0	6,0	10,0	5,0	7,0	9,0	8,0
$t_П$, °С	450	350	250	500	550	325	225	425	525	300
$\beta_{ОК}$	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9
$t_{ОК}$, °С	93	94	95	93	94	95	93	94	95	93
$T_{ТЭЦ}$, час	4600	4300	4500	4700	5000	5200	5500	5700	5300	4400

* ***Примечание:*** *при отсутствии отчества принять букву Ы.*

Порядок решения. Годовой отпуск теплоты от ТЭЦ определяется отдельно для производственно-технологических и коммунально-бытовых потребностей. Нужды производственно-технологических потребителей покрываются технологическим паром, а коммунально-бытовых потребителей – сетевой (горячей) водой.

Для правильного выбора оборудования ТЭЦ необходимо знать сантехническую нагрузку производственно-технологических потребителей, которая покрывается сетевой водой и добавляется к коммунально-бытовой нагрузке.

А. Производственно-технологическое теплопотребление

1. Расчетная производственно-технологическая тепловая нагрузка (теплота) за один час определяется по формуле:

$$Q_П = D_П\left[h_П - \beta_{ОК}\left(h_{ОК} - h_{ХЗ}\right) - h_{ХЗ}\right] \cdot \left(1+q_П\right),$$

где $h_П$ – энтальпия технологического (свежего) пара, кДж/кг;

$h_{ОК}$ – энтальпия обратного конденсата, кДж/кг;

$h_{ХЗ}$ – энтальпия холодной воды зимой, кДж/кг;

$q_П$ – доля тепловых потерь в паропроводах (принять 0,06...0,10).

Значение (численное) энтальпии технологического пара определяется по заданным значениям $p_П$ и $t_П$, пользуясь h-s диаграммой для водяного пара (приложение А).

Энтальпию обратного конденсата можно определить по формуле:

$$h_{îê} = ñ_Ð \cdot t_{îê},$$

где $c_Р = 4{,}19$ кДж/(кг · К) – удельная массовая теплоемкость воды.

Энтальпия холодной воды $h_{õç} = 4{,}19t_{õç}$, кДж/кг ($t_{ХЗ}$ – температура холодной воды, зимой принять равной 5 °С).

2. Годовой отпуск пара на производственно-технологические нужды, т:

$$D_{Ï\ ãîä} = D_Ï \cdot Ò_{ÒÝÖ}.$$

3. Годовой отпуск теплоты на производственно-технологические нужды, ГДж:

$$Q_{Ï\ ãîä} = Q_Ï \cdot Ò_{ÒÝÖ}.$$

4. Годовой график производственно-технологического теплоснабжения.

График следует строить используя значение относительно-

го теплопотребления и заданной величины $T_{ТЭЦ}$ (см. приложение Е, табл. Е.1). Каждая ордината графика вычисляется по формуле:

$$Q_{\text{П}\,i} = \overline{Q}_{\text{П}\,i}\,\frac{Q_{\text{П}}^{\text{Г}}}{\sum_{i=1}^{12}\overline{Q}_{\text{П}\,i}},$$

где $Q_{\text{ПГ}}$ – отпуск теплоты за текущий месяц, ГДж;

$\overline{Q}_{\text{ПГ}}$ – то же в относительных величинах по таблице (приложение Е1).

Б. Коммунально-бытовое теплопотребление

Нагрузки коммунально-бытовых потребителей – расчетные, средние и годовые – определяются по известной методике. Ниже приводится методика этого расчета, а необходимые справочные материалы представлены в приложении Е.

Б.1. Расчетные тепловые нагрузки

Расчетная нагрузка отопления, Вт (МВт) и ГДж/ч:

$$Q_{\text{О}}^{\text{Р}} = q_{\text{О}}\,\text{А}\,(1+k_1) = q_{\text{О}}\,m f\,(1+k_1),$$

где q_0 – укрупненный показатель максимального теплового потока на отопление жилых зданий на 1 м общей площади (приложение П.2), Вт/ м^2 ;

A = m f – общая площадь жилых зданий, м^2;

f – норма общей площади в жилых зданиях на 1 чел. (может приниматься равной 18 м/чел.);

$k_1 = 0{,}25$ – коэффициент, учитывающий долю теплового потока на отопление общественных зданий.

Расчетная нагрузка вентиляции, Вт (МВт) и ГДж/ч:

$$Q_{\text{В}}^{\text{Р}} = k_1 k_2 q_{\text{О}} A,$$

где k_2 – коэффициент, учитывающий долю теплового потока на вентиляцию общественных зданий ($k_2 = 0{,}4$ для зданий постройки до 1985 г., $k_2 = 0{,}6$ после 1985 г.).

Расчетная нагрузка горячего водоснабжения, Вт (МВт) и ГДж/ч:

$$Q_{\text{Г}}^{\text{Р}} = q_{\text{Г}} m,$$

где $q_г$ – укрупненный показатель среднего теплового потока на горячее водоснабжение на 1 чел. (приложение П.3), Вт/чел.

5. Расчетная нагрузка коммунально-бытовых потребителей, Вт (МВт) и ГДж/ч:

$$Q_K^P = Q_O^P + Q_B^P + Q_Г^P.$$

Б.2. Средние тепловые нагрузки

1. Средняя нагрузка отопления, Вт (МВт) и ГДж/ч:

$$Q_О^{СР} = Q_О^Р \frac{t_В - t_O}{t_В - t_O^P},$$

где $t_В$ – средняя температура внутреннего воздуха отапливаемых зданий ($t_В$ = 18 °С для жилых и общественных зданий, $t_В$ = 16 °С – для производственных зданий);

t^p_o и t_o – расчетная для отопления и средняя за отопительный период температуры наружного воздуха (приложение П.4).

2. Средняя нагрузка вентиляции, Вт (МВт) и ГДж/ч:

$$Q_В^{СР} = Q_В^Р \frac{t_В - t_O}{t_В - t_O^P}.$$

3. Средняя за отопительный период нагрузка горячего водоснабжения, Вт (МВт) и ГДж/ч:

$$Q_Г^{СР} = Q_Г^P.$$

4. Средняя за неотопительный период нагрузка горячего водоснабжения, Вт (МВт) и ГДж/ч:

$$Q_{ГЛ}^{СР} = Q_Г^{СР} \frac{55 - t_{ХЛ}}{55 - t_Х} \beta,$$

где $t_х$ = 5 °С и $t_{хгі}$= 15 °С – соответственно температуры холодной (водопроводной) воды в отопительный и неотопительный периоды; β – коэффициент, учитывающий изменение среднего расхода воды на горячее водоснабжение в неотопительный период по отношению к отопительному (β = 0,8 – для жилых и общественных зданий; β = 1,5 – то же для курортных и южных городов; β = 1 – для промпредприятий); выбирается самостоятельно.

5. Средняя за отопительный период нагрузка коммунально-бытовых потребителей:

$$Q_{\hat{E}}^{\tilde{N}\eth} = Q_{\hat{I}}^{\tilde{N}\eth} + Q_{\hat{A}}^{\tilde{N}\eth} + Q_{\tilde{A}}^{\tilde{N}\eth}.$$

Б.3. Годовые расходы теплоты

1. Годовой расход теплоты на отопление, ГДж:

$$Q_{\hat{I}}^{\tilde{A}} = Q_{\hat{I}}^{\tilde{N}\eth} h_{\hat{I}} ,$$

где h_o – длительность отопительного периода (приложение П1.4), ч.

2. Годовой расход теплоты на вентиляцию, ГДж:

$$Q_{\hat{A}}^{\tilde{A}} = Q_{\hat{A}}^{\tilde{N}\eth} h_O z/24,$$

где z = 16 ч – время работы за сутки систем вентиляции общественных зданий.

3. Годовой расход теплоты на горячее водоснабжение, ГДж:

$$Q_{\tilde{A}}^{\tilde{A}} = Q_{\tilde{A}}^{\tilde{N}\eth} h_O + Q_{\tilde{A}\ddot{E}}^{\tilde{N}\eth} \left(8400 - h_O\right).$$

4. Годовой расход теплоты на коммунально-бытовые нужды, ГДж:

$$Q_{\hat{E}}^{\tilde{A}} = Q_{\hat{I}}^{\tilde{A}} + Q_{\hat{A}}^{\tilde{A}} + Q_{\tilde{A}}^{\tilde{A}}.$$

Б4. Отпуск теплоты по сетевой воде

Сантехническая нагрузка промышленных предприятий покрывается сетевой водой и суммируется с коммунально-бытовой нагрузкой.

Расчетная сантехническая нагрузка, МВт и ГДж/ч:

$$Q_C^P = \gamma Q_{\ddot{I}}^P \cdot$$

Можно допустить, что закономерности изменения сантехнической и коммунально-бытовой нагрузки в зависимости от температуры наружного воздуха совпадают. Тогда годовой отпуск теплоты на сантехнические нужды, ГДж:

$$Q_C^{\tilde{A}} = \frac{Q_C^P Q_{\hat{E}}^{\tilde{A}}}{Q_{\hat{E}}^P} \cdot$$

С учетом тепловых потерь в сетях расчетная нагрузка потребителей сетевой воды составит, МВт и ГДж/ч:

$$Q^{P}_{C\hat{A}} = (1+\overline{q})\left(Q^{P}_{\hat{E}} + Q^{P}_{C}\right),$$

а годовой отпуск теплоты в сетевой воде, ГДж:

$$Q^{\tilde{A}}_{C\hat{A}} = (1+\overline{q})\left(Q^{\tilde{A}}_{\hat{E}} + Q^{\tilde{A}}_{C}\right),$$

где q – доля тепловых потерь в тепловых сетях (принимается самостоятельно в пределах от 0,04 до 0,08).

Результаты расчета нагрузок потребителей сетевой воды обобщаются в виде графика тепловых нагрузок по продолжительности [1]. Он совмещается с графиком изменения нагрузок от температуры наружного воздуха $t_{Í}$. В левой части графика приводятся зависимости нагрузок отопления Q_0, вентиляции $Q_{Â}$ и горячего водоснабжения $Q_г$ (МВт) от t,,, а затем путем их графического суммирования – зависимость нагрузки коммунально-бытовых потребителей Q_K от $t_{Í}$. Далее при расчетной температуре для отопления откладывается Q^{P}_{CB} и строится зависимость Q_{CB} от $t_{Í}$ при условии, что любой t,,, ниже расчетной соответствует численное значение разности ($Q_{CB} - Q_K$), пропорциональное значению Q_K:

$$Q^{\tilde{A}}_{C} = \frac{Q^{P}_{C} Q^{\tilde{A}}_{\hat{E}}}{Q^{P}_{\hat{E}}}.$$

В правой части строится собственно график тепловых нагрузок по продолжительности, на котором по оси абсцисс приводятся продолжительность стояния температур наружного воздуха от +18 °С (8400 ч) и +8 °С (hо) до расчетной для отопления (прилож. Г1.4), а по оси ординат соответствующие им нагрузки по сетевой воде. Весь график строится в линейном масштабе, удобном для построения и чтения. Пример графика тепловых нагрузок по продолжительности приводится в [1].

В заключение результаты расчета тепловых нагрузок необходимо свести в таблицу (прилож. П.5).

В. Выбор основного оборудования

К основному оборудованию промышленно-отопительных ТЭЦ относятся паровые и водогрейные котлы и паровые турбины.

Критерием правильности выбора состава, типа и мощности

основного оборудования является достижимость оптимальных значений расчетных коэффициентов теплофикации по пару $а^{р}_{п}$ и сетевой воде $а^{р}_{св}$ при соответствующих величинах технологической и коммунально-бытовой (в сумме с сантехнической) нагрузок. Оптимальные коэффициенты теплофикации определяются на основе технико-экономических расчетов и зависят от мощностного ряда выпускаемых теплофикационных паровых турбин. Соответствующие технико-экономические исследования показывают, что оптимальные значения расчетных коэффициентов теплофикации по пару и сетевой воде составляют соответственно:

$$\alpha^{р}_{п} = 0{,}7\ldots\ldots1{,}0 \text{ и } \alpha^{р}_{св} = 0{,}4\ldots..0{,}7 \text{ [1].}$$

Напомним, что:

$$\alpha^{Р}_{П} = \frac{Д_{П}^{ПТ,Р}}{Д_{П}^{Р}},$$

$$\alpha^{Р}_{СВ} = \frac{Д_{СВ}^{Т,ПТ}}{Д_{СВ}^{Р}},$$

где $д_{п}^{пт,р}$ – соответственно отпуск теплоты и пара из производственных отборов выбранных турбин типа ПТ и Р, кг/с;

$Q_{св}^{т,пт}$ – отпуск теплоты по сетевой воде из отопительных отборов выбранных турбин типа Т и ПТ, МВт.

Характеристики паровых турбин, водогрейных и энергетических паровых котлов приведены в приложениях (Е: 6, 7, 8) [7, 8]. При выборе оборудования следует выполнять следующие условия.

• Выбираются наиболее крупные агрегаты (с учетом перспективного роста тепловых нагрузок).

• Оборудование должно быть по возможности однотипным, но обеспечивающим все требуемые виды теплопотребления. В частности, турбины типа Р следует выбирать при трехсменном режиме работы предприятий, что условно можно считать имеющим место при годовом числе часов использования максимума производственно-технологической нагрузки свыше 5000 ч.

Встроенные пучки конденсаторов теплофикационных турбин типа Т и ПТ (прилож. Е 6) используются для подогрева

подпиточной воды перед химчисткой в открытых системах теплоснабжения и сетевой воды перед сетевыми подогревателями в закрытых системах.

Пиковые нагрузки производственно-технологических потребителей по пару покрываются с помощью редукционно-охладительных установок (РОУ), а потребителей сетевой (горячей) воды с помощью пиковых водогрейных котлов (ПВК) (прилож. Е. 8). Избыточная теплопроизводительность выбираемых ПВК должна быть минимальной.

Выбор типа и количества энергетических паровых котлов осуществляется по суммарному расходу свежего пара на все выбранные турбины и РОУ (ДР°У) с коэффициентом 1,02 (прилож. Е.7). Двухпроцентная добавка дается на неучтенные потери теплоты в цикле ТЭЦ. Таким образом, требуемая паропроизводительность ТЭЦ, кг/с:

$$Д_{ТЭЦ} = 1{,}02\left[\sum\left(Д_{т}\right)_{Т,ПТ,Р} + Д_{т}^{ВПУ}\right],$$

где Д° – номинальный расход свежего пара на все выбранные турбины данного типа (Т, ПТ или Р), кг/с.

Расход свежего пара на РОУ определяется по формуле, кг/с:

$$Д_{О}^{РОУ} = \left(Д_{П}^{Р} - Д_{П}^{ПТ,Р}\right)\frac{h_{П} - h_{ПВ}}{h_{О}\eta_{РОУ} - h_{ПВ}},$$

где $Д_{п}^{пт,р}$ – отпуск пара на производственно-технологические нужды из отборов выбранных турбин типа ПТ и Р, кг/с;

h_0 – энтальпия свежего пара за котлами (по [7]), кДж/кг);

$\eta_{роу}$ – КПД РОУ (принимается равным 0,98);

$h_{ПВ}$ – энтальпия питательной воды, выбирается по давлению и температуре питательной воды (прилож. Б) или с помощью таблиц [7], кДж/кг. Тип и количество выбранных к установке энергетических котлов должны обеспечить минимально возможный запас по паропроизводительности.

Турбины типа Р устанавливаются вместе с турбинами типа ПТ и (или) Т. Состав и характеристики выбранного оборудования ТЭЦ сводятся в таблицу (прилож. Е 9).

В заключение приводится принципиальная схема промышленно-отопительной ТЭЦ на листе формата А1; должны быть приведены все условные обозначения. Дублируемое однотип-

ное оборудование (турбины, котлы) можно отобразить одним структурным элементом, но с указанием количества (например, 2хТ-175/230-130). Примеры схем ТЭЦ приведены в литературе [6, 7, 8, 9, 10].

Задание 2

Выполнить тепловой расчет пароводяного кожухотрубного теплообменника, предназначенного для нагрева G_2, т/ч воды от температуры $t'_2 = 10$ °С до температуры t_2. Вода движется внутри латунных трубок диаметром:

$$\frac{d_i}{d_{âí}} = \frac{17}{14}.$$

Коэффициент теплопроводности латуни $\lambda = 85{,}5$ Вт/м К.

Греющий теплоноситель – сухой насыщенный пар давлением $P_н$, МПа. Скорость движения воды принять w = 1...2,5 м/с. Изобразить схему изменения температур теплоносителей по поверхности аппарата. Данные для расчета выбрать по таблице 11.

Таблица 11 – Исходные данные задания 2

Параметры	Исходные данные по начальной букве фамилии									
	АКФ	**БЛХ**	**ВМЧ**	**ГНЦ**	**ДОШ**	**ЕПЩ**	**ЁРЫ**	**ЖСЭ**	**ЗТЮ**	**ИУЯ**
G_2 т/ч	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
Рн, МПа	0,476	0,547	0,147	0,17	0,198	0,234	0,27	0,315	0,361	0,419
	Предпоследняя цифра шифра									
t_2	100	95	90	85	80	85	90	95	100	105

Рекомендации к выполнению задания 2

Поверхность теплообменного аппарата находят из уравнения теплопередачи: $Q = k^{\delta} F \Delta t_{ë}$, где k^{δ} – коэффициент теплопередачи с учетом загрязнения трубок:

$$k^{\delta} = \frac{0{,}8}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}, \text{Вт/м}^2\text{К},$$

где F, м^2 – поверхность аппарата;

$\Delta t_л$C – среднелогарифмический температурный напор;

Q, Вт – количество передаваемой теплоты.

Теплоту Q определяют по уравнению теплового баланса для холодного теплоносителя.

Коэффициент теплоотдачи λ_1 при конденсации пара на вертикальной трубе определяется по формуле:

$$\alpha_1 = 1{,}15\sqrt[4]{\frac{\lambda^3 g\rho r}{v}\cdot\frac{1}{h\Delta t}},$$

где $\Delta t = t_н - t_c$;

t_c – средняя температура стенки трубы; $t_н$ – температура насыщения, $t_н = f(P)$; $t_c = 0{,}5[t_н + 0{,}5(t'_2 + t_2)]$.

Физические параметры пленки конденсата выбирают по П. 10 приложения по средней температуре пленки $t_{пл}$, $t_{пл} = 0{,}5(t_н + t_c)$; скрытую теплоту парообразования r – по температуре $t_н$ (прилож. П. 11). В расчетную формулу r подставляют в Дж/кг. В первом приближении высоту трубы h задают 2 м.

Коэффициент теплоотдачи от стенки к воде λ_2 определяют по критериальному уравнению для турбулентного режима движения воды в трубках:

$$Nu_{d,ж} = 0{,}021 Re^{0,8}_{d,ж} Pr^{0,43}_{ж}\left(\frac{Pr_{ж}}{Pr_c}\right)^{0,25}\cdot\varepsilon_l.$$

Поправочный коэффициент ε_ℓ ,= 1, если $\frac{\ell}{d}$ 50, в других случаях ε_ℓ находят в справочниках:

$$\varepsilon_l = f\left(\frac{l}{d}, Re\right).$$

Физические параметры воды находят по П. 10 приложения по средней температуре $t_ж = 0{,}5(t'_2 + t_2)$, Pr_c – по температуре стенки t_c. Скорость воды выбирают в заданном интервале.

Температурный напор:

$$\Delta t_ë = \frac{\Delta t\delta - \Delta tì}{h\ \frac{\Delta t\delta}{\Delta tì}}.$$

Число трубок в одном ходу:

$$m = \frac{4G_2}{3600\rho w \pi d_{вн}^2},$$

m округляют до десятков.

Выбрать число ходов z = 4, тогда общее число труб в аппарате составит:

$$n = mz.$$

Действительная высота труб:

$$H = \frac{F}{\pi d_{ср} \cdot n}, м.$$

Невязка расчета $\Delta = \frac{h-H}{h} \cdot 100$, %.

При получении невязки более 30 % необходимо изменить число ходов, скорость движения воды или высоту труб.

Диаметр трубной доски при расположении труб по вершинам равностороннего треугольника определить из соотношения:

$$D = 1{,}13t\sqrt{0{,}87 \cdot \frac{n}{f}},$$

где t – шаг между трубками, t = (l,25...2,5)$d_н$, n – общее количество труб в аппарате, ф – коэффициент заполнения трубной доски, для многоходовых аппаратов ф = 0,6.

Задание 3

Рассчитать теоретический цикл двигателя внутреннего сгорания (ДВС), считая, что рабочим телом является воздух с начальными параметрами P_1 = 0,1МПа, t_1 = 20 °С. Определить основные параметры рабочего тела *P, V, T* во всех точках цикла, изменение внутренней энергии Δ*U*, энтальпии Δ*h*, энтропии Δ*S* для всех процессов и для цикла; теплоту и работу для процессов и для цикла, а также термический КПД цикла. Дать сводную таблицу и изобразить цикл в *PV*- и *TS*-диаграммах. Исходные данные брать из таблицы 12.

Таблица 12 – Исходные данные задания 3

Начальная буква имени	Цикл	Степень сжатия, ε	Начальная буква имени	Степень повышения давления, λ	Степень предварительного расширения, ρ
АКФ	Отто *)	8	**АКФ**	2,4	2,1
БЛХ		9	**БЛХ**	2,3	2,0
ВМЧ		10	**ВМЧ**	2,2	1,9
ГНЦ	Дизеля **)	16	**ГНЦ**	2,1	1,8
ДОШ		17	**ДОШ**	2,0	1,7
ЕПЩ		18	**ЕПЩ**	1,9	1,6
ЁРЫ	Тринклера-Сабатэ	12	**ЁРЫ**	1,8	1,5
ЖСЭ		13	**ЖСЭ**	1,7	1,4
ЗТЮ		14	**ЗТЮ**	1,6	1,3
ИУЯ		15	**ИУЯ**	1,5	1,2

Примечание: независимо от исходных данных принимать *) $\rho = 1$ для циклов с изохорным подводом теплоты (цикл Отто) и **) $\lambda = 1$ для циклов с изобарным подводом теплоты (цикл Дизеля).

Рекомендации к выполнению задания 3

Для воздуха, как для идеального газа, принять: теплоемкости $C_p = 1{,}01$кДж/(кгК) и $C_v = 0{,}72$ кДж/(кгК); газовую постоянную $R = 287$ Дж/(кгК), показатель адиабаты $K = 1{,}41$. Для варианта 99 задан цикл ДВС со смешанным подводом теплоты (цикл Тринклера-Сабатэ).

Начальный удельный объем рабочего тела по уравнению Клапейрона:

$$v_1 = \frac{R \cdot T_1}{P_1} = 287 \cdot 293(0{,}1 \cdot 10^6) = 0{,}841\text{ì}^{\ 3}/\text{êã}.$$

По степени сжатия $\varepsilon = v1/v2$ находим удельный объем рабочего тела в точке 2:

$$v_2 = \frac{v_1}{\varepsilon} = 0{,}841/15 = 0{,}0561\text{м}^3/\text{кг}.$$

Процесс 1–2 – это адиабатное сжатие рабочего тела, а уравнение адиабатного процесса:

$$P_1 v_1^K = P_2 v_2^K \cdot$$

Откуда находится давление в точке 2:

$$P_2 = P_1 \cdot \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^K = P_1 \cdot \varepsilon^k = 0{,}1 \cdot 1{,}5^{1{,}41} = 4{,}55\text{МПа}.$$

Температура в точке 2 находится по уравнению Клапейрона:

$$T_2 = P_2 \cdot \left(\frac{v_2}{R}\right) = 4{,}55 \cdot 10^6 \cdot \frac{0{,}0561}{287} = 889\text{K}(616\ ^{o}\text{Ñ}).$$

Для изохорного процесса подвода тепла к рабочему телу 2–3 характеристикой является степень повышения давления $\lambda = P3/P2$, откуда находится давление в точке 3:

$$P_3 = \lambda \cdot P_2 = 1{,}5 \cdot 4{,}55 = 6{,}82\text{МПа}.$$

С учетом того, что для изохорного процесса $v_3 = v_2 = 0{,}0561$ м^3/кг температура рабочего тела в точке 3 по уравнению Клапейрона:

$$T_3 = P_3 \cdot \left(\frac{v_3}{R}\right) = 6{,}82 \cdot 10^6 \cdot \frac{0{,}0561}{287} = 1333\text{K}(1060\ ^{o}\text{Ñ}).$$

Для изобарного процесса провода тепла к рабочему телу 3–4 характеристикой является степень предварительного расширения $\rho = V_4/V_3$, откуда находится удельный объем рабочего тела в точке 4:

$$v_4 = \rho \cdot v_3 = 1{,}2 \cdot 0{,}0561 = 0{,}0673\text{м}^3/\text{кг}.$$

Для избранного процесса $P_4 = P_3 = 6{,}82$ МПа, тогда температура рабочего тела в точке 4 по уравнению Клапейрона:

$$T_4 = P_4 \cdot \frac{v_4}{R} = 6{,}82 \cdot 10^6 \cdot \frac{0{,}0673}{287} = 1600\text{K}(1327\ ^{o}\text{Ñ}).$$

С учетом того, что процесс 5–1 – это изохорный отвод тепла от рабочего тела, $v_5 = v_1 = 0{,}841$ м^3/кг. Тогда для адиабатного процесса расширения рабочего тела 4–5: $P_4 * v_4^K = P_5 * v_3^K$, откуда находится давление в точке 5:

$$P_5 = P_4 \cdot \left(\frac{v_5}{R}\right)^K = 0{,}1938 \cdot 10^6 \cdot \frac{0{,}841}{287} = 568\text{K}(295\ ^{o}\text{Ñ}).$$

Параметры всех точек цикла сводим в таблице 13.

Таблица 13 – Рассчитанные параметры точек цикла

Параметры	Точки				
	1	2	3	4	5
Давление P, МПа	0,1	4,55	6,82	6,82	0,1938
Удельный объем v, м³/кг	0,841	0,0561	0,0561	0,0673	0,0561
Температура T, K	293	889	1333	1600	568
Температура t, °C	20	616	1060	1327	295

Изменение внутренней энергии в процессах и для цикла в целом:

$$\Delta U_{1\text{-}2} = C_V \cdot (T_2 - T_1) = 0{,}72 \cdot (889 - 293) = 429{,}12 \text{ кДЖ/кг};$$

$$\Delta U_{2\text{-}3} = C_V \cdot (T_3 - T_2) = 0{,}72 \cdot (1333 - 889) = 319{,}68 \text{ кДЖ/кг};$$

$$\Delta U_{3\text{-}4} = C_V \cdot (T_4 - T_3) = 0{,}72 \cdot (1600 - 1333) = 192{,}24 \text{ кДЖ/кг};$$

$$\Delta U_{4\text{-}5} = C_V \cdot (T_5 - T_4) = 0{,}72 \cdot (568 - 1600) = -743{,}04 \text{ кДЖ/кг};$$

$$\Delta U_{5\text{-}1} = C_V \cdot (T_1 - T_5) = 0{,}72 \cdot (293 - 568) = -198{,}00 \text{ кДЖ/кг};$$

$$\Delta U_{Ц} = \sum(\Delta U_i) = 0.$$

Суммарное изменение внутренней энергии в цикле $\Delta U_{Ö} = 0$, что подтверждает правильность расчетов, так как:

$$\Delta U_{Ö} = U_1 - U_1 = 0.$$

Изменение энтальпии в процессах и для цикла в целом:

$$\Delta h_{1-2} = C_P \cdot (T_2 - T_1) = 1{,}01 \cdot (889 - 293) = 601{,}96 \text{ кДЖ/кг};$$

$$\Delta h_{2-3} = C_P \cdot (T_3 - T_2) = 1{,}01 \cdot (1333 - 889) = 448{,}44 \text{ кДЖ/кг};$$

$$\Delta h_{3-4} = C_P \cdot (T_4 - T_3) = 1{,}01 \cdot (1600 - 1333) = 269{,}67 \text{ кДЖ/кг};$$

$$\Delta h_{4-5} = C_P \cdot (T_5 - T_4) = 1{,}01 \cdot (568 - 1600) = -1042{,}32 \text{ кДЖ/кг};$$

$$\Delta h_{5-1} = C_P \cdot (T_1 - T_5) = 1{,}01 \cdot (293 - 568) = -277{,}75 \text{ кДЖ/кг};$$

$\Delta h_{Ц} = \sum(\Delta h_i) = 0$, действительно: $\Delta h_{Ц} = h_1 - h_1 = 0$.

Изменение энтропии в процессах и для цикла в целом: $\Delta S_{1-2} = 0$, так как это процесс адиабатный, то есть без теплообмена между рабочим телом и окружающей средой:

$$\Delta S_{2-3} = C_V \cdot \ln\left(T_3/T_2\right) = 0{,}72 \cdot \ln(1333/889) = 0{,}292 \text{ кДЖ/(кг·K)};$$

$$\Delta S_{3-4} = C_P \cdot \ln\left(T_4/T_3\right) = 1{,}01 \cdot \ln(1600/1333) = 0{,}1844 \text{ кДЖ/(кг·K)};$$

$\Delta S_{4-5} = 0$, так как это процесс адиабатный;

$$\Delta S_{5-1} = C_V \cdot \left(T_1/T_5\right) = 0{,}72 \cdot \ln(293/568) = -0{,}447 \text{ кДЖ/(кг·K)};$$

$$\Delta S_{Ц} = \sum 0\left(\Delta S_i\right) = -0{,}6 \cdot 10^{-3} \text{кДЖ/(кг·K)} \quad 0.$$

Что также подтверждает правильность расчетов, так как:

$$\Delta S_{Ö} = S_1 - S_1 = 0.$$

Работа процессов и цикла в целом:

$$l_{1-2} = -\Delta U_{1-2} = -429{,}12 \text{ кДЖ/кг}.$$

Так как это процесс адиабатный, то есть без отвода теплоты от рабочего тела, поэтому внутренняя энергия рабочего тела возрастает за счет теплоты сжатия, а знак «–» означает затрату работы на сжатие газа.

$l_{2-3} = 0$, так как в изохорном процессе нет изменения объема газа, следовательно, работа против внешних сил не совершается.

$$l_{3-4} = R \cdot \left(T_3 - T_2\right) = 0{,}287 \cdot (1600-1333) = 76{,}63 \text{ кДЖ/кг};$$

$$l_{4-5} = -\Delta U_{4-5} = 743{,}04 \text{ кДЖ/кг};$$

$$l_{5-1} = 0;$$

$$l_{Ö} = \sum\left(l_i\right) = 390{,}55 \text{ êÄÆ/êã}.$$

Теплота процессов и цикла в целом: $q_{1-2} = 0$, так как это процесс адиабатный, то есть без теплообмена;

$$q_{2-3} = C_V \cdot \left(T_3 - T_2\right) = \Delta U_{2-3} = 319{,}68 \text{ кДЖ/кг};$$

$$q_{3-4} = C_P \cdot \left(T_4 - T_3\right) = \Delta h_{3-4} = 296{,}67 \text{кДЖ/кг};$$

$q_{4-5} = 0$, так как это процесс адиабатный;

$$q_{5-1} = C_V \cdot (T_1 - T_5) = \Delta U_{5-1} = -198 \text{ кДЖ/кг};$$

$$q_{\ddot{O}} = \sum (q_i) = 391{,}35 \text{ êÄÆ/êã} \quad l_{\ddot{O}.}$$

Что подтверждает правильность расчетов, так как для циклов:

$$\Delta U_{\ddot{O}} = 0,$$

$$q_{\ddot{O}} = l_{\ddot{O}.}$$

Следовательно, по первому закону термодинамики термодинамический КПД цикла представляет собой отношение работы цикла к подведенной к рабочему телу теплоте:

$$\eta_t = \frac{l_{Ц}}{(q_{2\text{-}3} + q_{3\text{-}4})} = \frac{390{,}55}{319{,}68 + 269{,}67} = 0{,}663.$$

Проверка:

$$\eta = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \cdot \frac{\lambda \rho^{k} - 1}{(\lambda - 1) + k \cdot \lambda (\rho - 1)} =$$

$$= 1 - \frac{1}{15^{0{,}41}} \cdot \frac{1{,}5 \cdot 1{,}2^{1{,}41} - 1}{(1{,}5 - 1) + 1{,}41 \cdot 1{,}5(1{,}2 - 1)} = 0{,}665.$$

Погрешность расчета:

$$\delta = \frac{\eta - \eta_t}{\eta} \cdot 100\ \% = \frac{0{,}665 - 0{,}663}{0{,}665} \cdot 100\ \% = 0{,}3\% < 1\%,$$

то есть точность расчета достаточная.

Задание 4

Определить эффективную мощность Ne газотурбинной установки (ГТУ) без регенерации теплоты и ее эффективный КПД по заданной степени повышения давления $\beta = \frac{P_2}{P_1}$, известным адиабатным КПД турбины η_T и компрессора η_K, температуре воздуха перед компрессором t_1, температуре газа перед турбиной t_3 и по расходу воздуха через ГТУ *Gвоз*. Изобразить цикл ГТУ в PV- и TS-диаграммах. Показать, как зависит термический КПД ГТУ от степени повышения давления β. Исходные данные выбрать из таблицы 14.

Таблица 14 – Исходные данные задания 4

Начальная буква фамилии	t_1, °С	t_3, °С	β	Начальная буква фамилии	$\eta_к$	$\eta_т$	$B_{воз}$, кг/с
АКФ	30	850	7,2	**АКФ**	0,82	0,89	57
БЛХ	27	830	9,0	**БЛХ**	0,81	0,88	55
ВМЧ	24	880	8,8	**ВМЧ**	0,79	0,85	52
ГНЦ	20	900	8,5	**ГНЦ**	0,82	0,87	50
ДОШ	17	920	8,2	**ДОШ**	0,81	0,86	48
ЕПЩ	14	860	8,0	**ЕПЩ**	0,80	0,84	45
ЁРЫ	12	840	7,5	**ЁРЫ**	0,79	0,82	42
ЖСЭ	10	820	7,0	**ЖСЭ**	0,78	0,86	40
ЗТЮ	7	800	6,5	**ЗТЮ**	0,77	0,83	38
ИУЯ	6	780	6,2	**ИУЯ**	0,76	0,85	35

Рекомендации к выполнению задания 4

В расчете принимать теплоемкость воздуха и газа $C_p = 1{,}01$кДЖ/(кгК); показатель адиабаты $R = 1{,}41$; механический КПД ГТУ $\eta_м = 0{,}98$; давление воздуха перед компрессором $P_1 = 0{,}1$ МПа.

Удельный объем воздуха перед компрессором по уравнению Клапейрона:

$$v_1 = R \cdot \frac{T_1}{P_1} = 287 \cdot \frac{287}{(0{,}1 \cdot 10^6)} = 0{,}789 \text{ì}^3/\text{êã}.$$

Температура воздуха после компрессора при адиабатном теоретическом сжатии по уравнению адиабатного процесса:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} = \beta^{\frac{k-1}{k}};$$

$$T_2 = T_1 \cdot \beta^{\frac{k-1}{k}} = 287 \cdot 6{,}2^{\frac{1{,}41-1}{1{,}41}} = 473\text{К}.$$

А при действительном адиабатном сжатии – из выражения внутреннего адиабатного КПД компрессора:

$$\eta_К = \frac{(T_2 - T_1)}{(T_{2Д} - T_1)};$$

$$T_{2Д} = T_1 + \frac{(T_2 - T_1)}{\eta_К} = 287 + \frac{473 - 278}{0{,}82} = 516 \text{ К}.$$

Давление сжатого воздуха в компрессоре:

$$P_2 = P_1 \cdot \beta = 0{,}1 \cdot 6{,}2 = 0{,}62 \text{ МПа}.$$

Удельные объемы воздуха в точках 2, 2Д, 3 по уравнению Клапейрона:

$$v_2 = R \cdot \frac{T_2}{P_2} = 287 \cdot \frac{473}{(0{,}62 \cdot 10^6)} = 0{,}219 \text{ ì}^3/\text{êã};$$

$$v_{2Ä} = R \cdot \frac{T_{2Ä}}{P_2} = 287 \cdot \frac{516}{(0{,}62 \cdot 10^6)} = 0{,}239 \text{ ì}^3/\text{êã};$$

$$v_3 = R \cdot \frac{T_3}{P_3} = 287 \cdot \frac{1033}{(0{,}62 \cdot 10^6)} = 0{,}478 \text{ ì}^3/\text{êã}.$$

Температура газов после газовой турбины при адиабатном теоретическом расширении:

$$\frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{P_3}{P_4}\right)^{\frac{k-1}{k}} = \beta^{\frac{k-1}{k}};$$

$$T_4 = T_3 \cdot \beta^{\frac{k-1}{k}} = 1033 \cdot 6{,}2^{\frac{1{,}41-1}{1{,}41}} = 808\text{K}.$$

А при действительном адиабатном расширении – из выражения внутреннего адиабатного КПД газовой турбины:

$$\eta_T = \frac{(T_3 - T_{4Д})}{(T_3 - T_4)},$$

$$T_{4Д} = T_3 - (T_3 - T_4) \cdot \eta_T = 1033 - (1033 - 608) \cdot 0{,}89 = 655 \text{ К}.$$

Удельные объемы газа в точках 4, 4Д по уравнению Клапейрона:

$$v_4 = R \cdot \frac{T_4}{P_4} = 287 \cdot \frac{608}{(0{,}1 \cdot 10^6)} = 1{,}74 \text{ ì}^3/\text{êã};$$

$$v_{4Ä} = R \cdot \frac{T_{4Ä}}{P_2} = 287 \cdot \frac{655}{(0{,}62 \cdot 10^6)} = 1{,}88 \text{ ì}^3/\text{êã}.$$

Для построения цикла ГТУ в TS-диаграмме необходимо

определить изменения энтропии в процессах:

$$\Delta S_{2-3} = C_P \cdot \ln\left(\frac{T_3}{T_2}\right) = 1{,}01 \cdot \ln\left(\frac{1033}{473}\right) = 0{,}79 \text{ кДж/(кг·К)},$$

$$\Delta S_{2-2Д} = C_P \cdot \ln\left(\frac{T_{2Д}}{T_2}\right) = 1{,}01 \cdot \ln\left(\frac{516}{473}\right) = 0{,}088 \text{ кДж/(кг·К)},$$

$$\Delta S_{4-1} = C_P \cdot \ln\left(\frac{T_1}{T_4}\right) = 1{,}01 \cdot \ln\left(\frac{287}{608}\right) = -0{,}79 \text{ кДж/(кг·К)},$$

$$\Delta S_{4-4Д} = C_P \cdot \ln\left(\frac{T_{4Д}}{T_4}\right) = 1{,}01 \cdot \ln\left(\frac{655}{608}\right) = 0{,}079 \text{ кДж/(кг·К)}.$$

Эффективная работа в ГТУ:

$$l_e = l_i \cdot \eta_M = \left[C_P \cdot (T_3 - T_4) \cdot \eta_T - \frac{C_P \cdot (T_2 - T_1)}{\eta_K}\right] \cdot \eta_M =$$

$$= \left[1{,}01 \cdot (1033 - 608) \cdot 0{,}89 - \frac{1{,}01 \cdot (473 - 287)}{0{,}82}\right] \cdot 0{,}98 = 139{,}2 \text{кДж/кг}.$$

Эффективный КПД ГТУ:

$$\eta_e = \frac{l_e}{q_1} = \frac{\frac{l_e}{q_1}}{C_P \cdot (T_3 - T_{2Д})} = \frac{139{,}2}{1{,}01 \cdot (1033 - 516)} = 0{,}267.$$

Эффективная мощность ГТУ:

$$N_е = l_е \cdot G_{ВО\ С} = 139{,}2 \cdot 10^{-3} \cdot 57 = 7{,}93 \text{ М Вт}.$$

Зависимость термического КПД цикла ГТУ от степени повышения давления определялась по выражению:

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\beta^{\frac{k-1}{k}}} \cdot$$

7. СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

7.1. Основная литература

1. Аметистов, Е. В. Основы современной энергетики : учебник для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки «Теплоэнергетика», «Электроэнергетика», «Энергомашиностроение» / Е. В. Аметистов. – М. : изд-во МЭИ, 2010. – 453 с.

2. Барочкин, Е. В. Общая энергетика: курс лекций / Е. В. Барочкин, С. А. Панков, Г. В. Ледуховский ; Иван. гос. энергет. ун-т им. В. И. Ленина; под ред. Е. В. Барочкина. – Иваново : изд-во Ивановск. гос. энерг. ун-та, 2013. – 295 с.

3. Быстрицкий, Г. Ф. Основы энергетики : учебник для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлениям 654500 «Электромеханика, электротехника и электротехнологии» и 650900 «Электроэнергетика» / Г. Ф. Быстрицкий. – М. : КноРус, 2013. – 350 с.

4. Старовойтов, В. Н. Общая энергетика : учебное пособие / В. Н. Старовойтов, В. Н. Лифанов ; Министерство образования и науки Российской Федерации ; Дальневосточный федеральный ун-т. – Владивосток : изд. дом Дальневост. федерал. ун-та, 2012. – Ч. 1. – 97 с.

5. Шаров, Ю. В. Электроэнергетика : учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки 1402000 «Электроэнергетика» / Ю. В. Шаров и др. – М. : Форум, 2013. – 383 с.

7.2. Дополнительная литература

6. Баранов, Н. Н. Нетрадиционные источники и методы преобразования энергии : учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки «Электроэнергетика» специальности «Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии» / Н. Н. Баранов. – М. : изд. дом МЭИ, 2012. – 383 с.

7. Виссарионов, В. И. Солнечная энергетика : учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению «Электроэнергетика» / В. И. Виссарионов и др. ; под ред. В. И. Виссарионова. – М. : изд. дом МЭИ, 2011. – 276 с.

8. Елистратов, В. В. Проектирование и эксплуатация установок нетрадиционной и возобновляемой энергетики. Ветроэлектрические установки : учеб. пособие / В. В. Елистратов, А. А. Панфилов ; Министерство образования и науки РФ ; Санкт-Петербургский гос. полит. ун-т. – СПб. : изд-во Политех. ун-та, 2011. – 114 с.

9. Зорин, В. М. Атомные электростанции. Вводный курс : учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности 140404 «Атомные электрические станции» направления подготовки дипломированных специалистов 140400 «Техническая физика» / В. М. Зорин ; Министерство образования и науки РФ, Моск. энерг. ин-т (технический ун-т). – 2-е изд., испр. и доп. – М. : изд. дом МЭИ, 2010. – 184 с.

10. Кудинов, А. А. Тепловые электрические станции : схемы и оборудование : учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности 140101 «Тепловые электрические станции» направления подготовки 140100 «Теплоэнергетика и теплотехника» / А. А. Кудинов. – М. : ИНФРА-М, 2012. – 323 с.

11. Кудрин, Б. И. Электроснабжение : учебник для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки «Электроэнергетика и электротехника» / Б. И. Кудрин. – М. : изд. центр «Академия», 2012. – 350 с.

12. Ляшков, В. И. Тепловые двигатели и нагнетатели : учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальностям «Промышленная теплоэнергетика», «Энергообеспечение предприятий» направления подготовки «Теплоэнергетика» / В. И. Ляшков. – М. : Абрис, 2012. – 164 с.

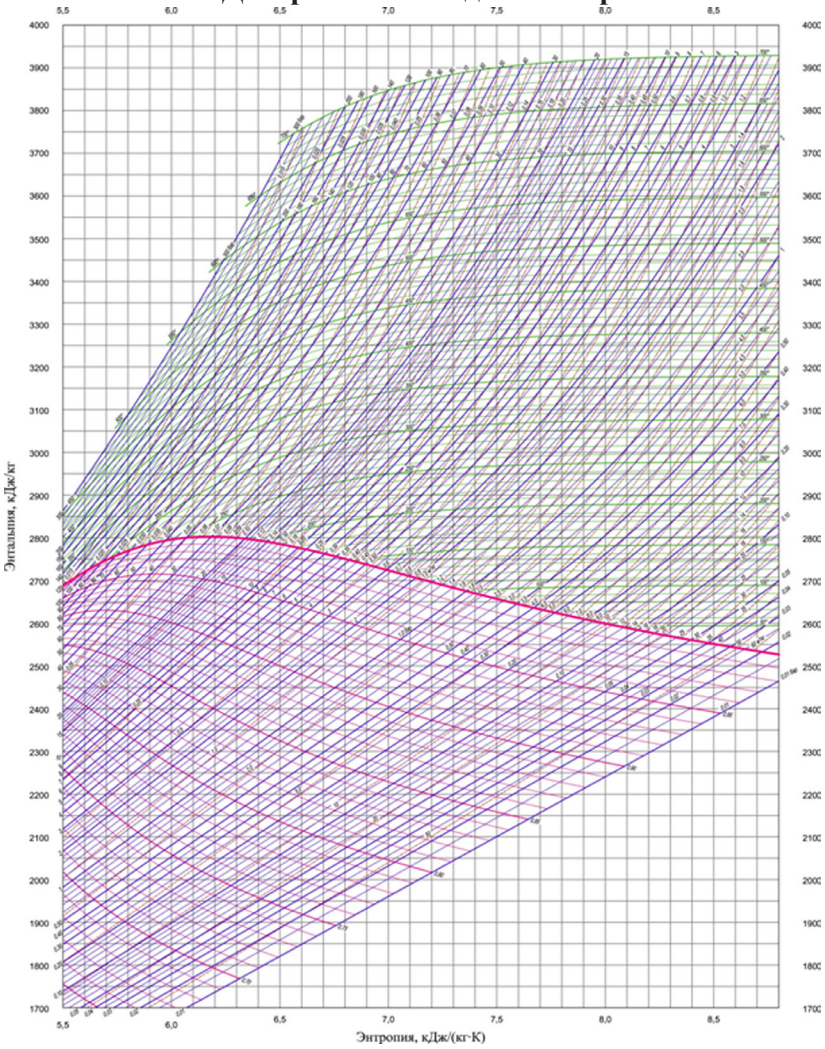
13. Филиппова, Т. А. Гидроэнергетика / Т. А. Филиппова и

др. – Новосибирск : изд-во Новосиб. гос. тех. ун-та, 2011. – 639 с.
14. Цанев, С. В. Газотурбинные энергетические установки : учебное пособие для вузов по направлению подготовки «Теплоэнергетика» / С. В. Цанев и др. ; под ред. С. В. Цанева. – М. : изд. дом МЭИ, 2011. – 426 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А

Диаграмма h-s водяного пара[1]



[1] *См.: URL : http://energoworld.ru/library/is-diagramma-sostoyaniya-vody-i-vodyanogo-para/*

Приложение Б

Физические свойства воды на линии насыщения

t, °C	$P \cdot 10^5$, Па	ρ, кг/м³	$h_{пв}$, кДж/кг	C_p, кДж/(кг · К)	λ, Вт/(м · К)	$\nu \cdot 10^6$, м²/с	Pr
50	1,013	988,0	209,3	4,180	0,648	0,556	3,55
60	1,013	983,2	251,1	4,184	0,659	0,479	3,00
70	1,013	977,7	293,0	4,189	0,668	0,415	2,55
80	1,013	971,8	334,9	4,196	0,675	0,366	2,25
90	1,013	965,3	377,0	4,204	0,680	0,326	1,95
100	1,013	958,4	419,1	4,220	0,684	0,295	1,75
110	1,43	951,0	461,4	4,233	0,685	0,272	1,60
120	1,98	943,1	503,7	4,250	0,686	0,252	1,47
130	2,70	934,8	546,4	4,266	0,686	0,233	1,35
140	3,61	926,1	589,1	4,287	0,685	0,217	1,26
150	4,76	917,0	632,2	4,313	0,684	0,203	1,17
160	6,18	907,4	675,4	4,346	0,681	0,191	1,10
170	7,92	897,3	719,3	4,380	0,676	0,181	1,05
180	10,03	886,9	763,3	4,417	0,672	0,173	1,03
190	12,55	876,0	807,8	4,459	0,664	0,165	0,965
200	15,55	863,0	852,5	4,505	0,658	0,158	0,932
210	19,08	852,8	897,7	4,555	0,649	0,153	0,915
220	23,2	840,3	943,7	4,614	0,645	0,149	0,898
230	28,3	827,3	990,2	4,685	0,637	0,145	0,88
240	33,48	813,6	1037	4,756	0,628	0,141	0,87
250	40,21	799,2	1086	4,853	0,618	0,137	0,87
260	46,94	784,0	1135	4,949	0,605	0,135	0,86
270	55,56	767,9	1185	5,089	0,590	0,133	0,85
280	64,19	750,7	1237	5,229	0,575	0,131	0,89
290	75,05	732,3	1290	5,486	0,558	0,129	0,92
300	85,92	712,5	1345	5,736	0,540	0,128	0,986

Приложение В

Физические свойства водяного пара на линии насыщения

Давление насыщенного пара	Температура кипения (конденсации)	Объемная масса (обратная плотность)	Плотность (пара)	Удельная энтальпия жидкой воды	Удельная энтальпия пара	Удельная теплота парообразования (конденсации)	Теплоемкость пара	Динамическая вязкость пара
бар	°C	м³/кг	кг/м³	кДж/кг	кДж/кг	кДж/кг	кДж/(кг · °C)	кг/(м · с)
0,02	17,51	67,006	0,015	73,45	2533,64	2460,19	1,8644	0,000010
0,03	24,10	45,667	0,022	101,00	2545,64	2444,65	1,8694	0,000010
0,04	28,98	34,802	0,029	121,41	2554,51	2433,10	1,8736	0,000010
0,05	32,90	28,194	0,035	137,77	2561,59	2423,82	1,8774	0,000010
0,06	36,18	23,741	0,042	151,50	2567,51	2416,01	1,8808	0,000010
0,07	39,02	20,531	0,049	163,38	2572,62	2409,24	1,8840	0,000010
0,08	41,53	18,105	0,055	173,87	2577,11	2403,25	1,8871	0,000010
0,09	43,79	16,204	0,062	183,28	2581,14	2397,85	1,8899	0,000010
0,1	45,83	14,675	0,068	191,84	2584,78	2392,94	1,8927	0,000010
0,2	60,09	7,650	0,131	251,46	2609,86	2358,40	1,9156	0,000011
0,3	69,13	5,229	0,191	289,31	2625,43	2336,13	1,9343	0,000011
0,4	75,89	3,993	0,250	317,65	2636,88	2319,23	1,9506	0,000011
0,5	81,35	3,240	0,309	340,57	2645,99	2305,42	1,9654	0,000012
0,6	85,95	2,732	0,366	359,93	2653,57	2293,64	1,9790	0,000012
0,7	89,96	2,365	0,423	376,77	2660,07	2283,30	1,9919	0,000012
0,8	93,51	2,087	0,479	391,73	2665,77	2274,05	2,0040	0,000012
0,9	96,71	1,869	0,535	405,21	2670,85	2265,65	2,0156	0,000012
1	99,63	1,694	0,590	417,51	2675,43	2257,92	2,0267	0,000012
1,1	102,32	1,549	0,645	428,84	2679,61	2250,76	2,0373	0,000012
1,2	104,81	1,428	0,700	439,36	2683,44	2244,08	2,0476	0,000012
1,3	107,13	1,325	0,755	449,19	2686,98	2237,79	2,0576	0,000013
1,4	109,32	1,236	0,809	458,42	2690,28	2231,86	2,0673	0,000013
1,5	111,37	1,159	0,863	467,13	2693,36	2226,23	2,0768	0,000013
1,5	111,37	1,159	0,863	467,13	2693,36	2226,23	2,0768	0,000013
1,6	113,32	1,091	0,916	475,38	2696,25	2220,87	2,0860	0,000013
1,7	115,17	1,031	0,970	483,22	2698,97	2215,75	2,0950	0,000013
1,8	116,93	0,977	1,023	490,70	2701,54	2210,84	2,1037	0,000013
1,9	118,62	0,929	1,076	497,85	2703,98	2206,13	2,1124	0,000013

Продолжение приложения В

1	2	3	4	5	6	7	8	9
2	120,23	0,885	1,129	504,71	2706,29	2201,59	2,1208	0,000013
2,2	123,27	0,810	1,235	517,63	2710,60	2192,98	2,1372	0,000013
2,4	126,09	0,746	1,340	529,64	2714,55	2184,91	2,1531	0,000013
2,6	128,73	0,693	1,444	540,88	2718,17	2177,30	2,1685	0,000013
2,8	131,20	0,646	1,548	551,45	2721,54	2170,08	2,1835	0,000013
3	133,54	0,606	1,651	561,44	2724,66	2163,22	2,1981	0,000013
3,5	138,87	0,524	1,908	584,28	2731,63	2147,35	2,2331	0,000014
4	143,63	0,462	2,163	604,68	2737,63	2132,95	2,2664	0,000014
4,5	147,92	0,414	2,417	623,17	2742,88	2119,71	2,2983	0,000014
5	151,85	0,375	2,669	640,12	2747,54	2107,42	2,3289	0,000014
5,5	155,47	0,342	2,920	655,81	2751,70	2095,90	2,3585	0,000014
6	158,84	0,315	3,170	670,43	2755,46	2085,03	2,3873	0,000014
6,5	161,99	0,292	3,419	684,14	2758,87	2074,73	2,4152	0,000014
7	164,96	0,273	3,667	697,07	2761,98	2064,92	2,4424	0,000015
7,5	167,76	0,255	3,915	709,30	2764,84	2055,53	2,4690	0,000015
8	170,42	0,240	4,162	720,94	2767,46	2046,53	2,4951	0,000015
8,5	172,94	0,227	4,409	732,03	2769,89	2037,86	2,5206	0,000015
9	175,36	0,215	4,655	742,64	2772,13	2029,49	2,5456	0,000015
9,5	177,67	0,204	4,901	752,82	2774,22	2021,40	2,5702	0,000015
10	179,88	0,194	5,147	762,60	2776,16	2013,56	2,5944	0,000015
11	184,06	0,177	5,638	781,11	2779,66	1998,55	2,6418	0,000015
12	187,96	0,163	6,127	798,42	2782,73	1984,31	2,6878	0,000015
13	191,60	0,151	6,617	814,68	2785,42	1970,73	2,7327	0,000015
14	195,04	0,141	7,106	830,05	2787,79	1957,73	2,7767	0,000016
15	198,28	0,132	7,596	844,64	2789,88	1945,24	2,8197	0,000016
16	201,37	0,124	8,085	858,54	2791,73	1933,19	2,8620	0,000016
17	204,30	0,117	8,575	871,82	2793,37	1921,55	2,9036	0,000016
18	207,11	0,110	9,065	884,55	2794,81	1910,27	2,9445	0,000016
19	209,79	0,105	9,556	896,78	2796,09	1899,31	2,9849	0,000016
20	212,37	0,100	10,047	908,56	2797,21	1888,65	3,0248	0,000016
21	214,85	0,095	10,539	919,93	2798,18	1878,25	3,0643	0,000016
22	217,24	0,091	11,032	930,92	2799,03	1868,11	3,1034	0,000016
23	219,55	0,087	11,525	941,57	2799,77	1858,20	3,1421	0,000016
24	221,78	0,083	12,020	951,90	2800,39	1848,49	3,1805	0,000017
25	223,94	0,080	12,515	961,93	2800,91	1838,98	3,2187	0,000017
26	226,03	0,077	13,012	971,69	2801,35	1829,66	3,2567	0,000017
27	228,06	0,074	13,509	981,19	2801,69	1820,50	3,2944	0,000017

Продолжение приложения В

1	2	3	4	5	6	7	8	9
28	230,04	0,071	14,008	990,46	2801,96	1811,50	3,3320	0,000017
29	231,96	0,069	14,508	999,50	2802,15	1802,65	3,3695	0,000017
30	233,84	0,067	15,009	1008,33	2802,27	1793,94	3,4069	0,000017
30	233,84	0,067	15,009	1008,33	2802,27	1793,94	3,4069	0,000017
31	235,66	0,064	15,512	1016,97	2802,33	1785,36	3,4442	0,000017
32	237,44	0,062	16,016	1025,41	2802,32	1776,90	3,4815	0,000017
33	239,18	0,061	16,521	1033,69	2802,25	1768,56	3,5187	0,000017
34	240,88	0,059	17,028	1041,79	2802,12	1760,33	3,5559	0,000017
35	242,54	0,057	17,536	1049,74	2801,95	1752,20	3,5932	0,000017
36	244,16	0,055	18,046	1057,54	2801,72	1744,17	3,6305	0,000017
37	245,75	0,054	18,557	1065,21	2801,44	1736,24	3,6679	0,000017
38	247,31	0,052	19,070	1072,73	2801,12	1728,39	3,7054	0,000017
39	248,84	0,051	19,585	1080,13	2800,75	1720,62	3,7429	0,000018
40	250,33	0,050	20,101	1087,40	2800,34	1712,94	3,7806	0,000018
41	251,80	0,048	20,619	1094,56	2799,89	1705,33	3,8185	0,000018
42	253,24	0,047	21,138	1101,61	2799,40	1697,79	3,8565	0,000018
43	254,66	0,046	21,660	1108,55	2798,87	1690,32	3,8946	0,000018
44	256,05	0,045	22,183	1115,39	2798,30	1682,91	3,9329	0,000018
45	257,41	0,044	22,708	1122,13	2797,70	1675,57	3,9715	0,000018
46	258,76	0,043	23,235	1128,78	2797,07	1668,29	4,0102	0,000018
47	260,08	0,042	23,763	1135,33	2796,40	1661,06	4,0492	0,000018
48	261,38	0,041	24,294	1141,80	2795,69	1653,89	4,0884	0,000018
49	262,66	0,040	24,827	1148,19	2794,96	1646,77	4,1279	0,000018
50	263,92	0,039	25,362	1154,50	2794,20	1639,70	4,1676	0,000018
51	265,16	0,039	25,898	1160,73	2793,41	1632,68	4,2076	0,000018
52	266,38	0,038	26,437	1166,88	2792,58	1625,70	4,2479	0,000018
53	267,58	0,037	26,978	1172,97	2791,74	1618,77	4,2885	0,000018
54	268,77	0,036	27,521	1178,98	2790,86	1611,88	4,3294	0,000018
55	269,94	0,036	28,067	1184,93	2789,95	1605,03	4,3706	0,000018
56	271,09	0,035	28,614	1190,81	2789,02	1598,21	4,4122	0,000018
57	272,23	0,034	29,164	1196,64	2788,07	1591,43	4,4541	0,000018
58	273,36	0,034	29,716	1202,40	2787,09	1584,69	4,4963	0,000019
59	274,47	0,033	30,270	1208,10	2786,08	1577,98	4,5389	0,000019
60	275,56	0,032	30,827	1213,75	2785,05	1571,31	4,5819	0,000019
61	276,64	0,032	31,386	1219,34	2784,00	1564,66	4,6253	0,000019
62	277,71	0,031	31,947	1224,88	2782,92	1558,04	4,6691	0,000019
63	278,76	0,031	32,511	1230,37	2781,82	1551,45	4,7133	0,000019
64	279,80	0,030	33,077	1235,81	2780,70	1544,89	4,7578	0,000019

1	2	3	4	5	6	7	8	9
65	280,83	0,030	33,646	1241,20	2779,55	1538,36	4,8029	0,000019
66	281,85	0,029	34,218	1246,54	2778,39	1531,85	4,8483	0,000019
67	282,85	0,029	34,792	1251,84	2777,20	1525,36	4,8943	0,000019
68	283,85	0,028	35,368	1257,09	2775,99	1518,90	4,9407	0,000019
69	284,83	0,028	35,948	1262,31	2774,76	1512,45	4,9875	0,000019
70	285,80	0,027	36,529	1267,48	2773,51	1506,03	5,0348	0,000019
71	286,76	0,027	37,114	1272,61	2772,24	1499,63	5,0827	0,000019
72	287,71	0,027	37,702	1277,70	2770,95	1493,25	5,1310	0,000019
73	288,65	0,026	38,292	1282,75	2769,64	1486,89	5,1798	0,000019
74	289,59	0,026	38,885	1287,77	2768,31	1480,54	5,2292	0,000019
75	290,51	0,025	39,481	1292,75	2766,97	1474,21	5,2791	0,000019
76	291,42	0,025	40,080	1297,70	2765,60	1467,90	5,3295	0,000019
77	292,32	0,025	40,681	1302,61	2764,22	1461,61	5,3805	0,000019
78	293,22	0,024	41,286	1307,49	2762,81	1455,32	5,4321	0,000019
79	294,10	0,024	41,894	1312,34	2761,39	1449,06	5,4843	0,000019
80	294,98	0,024	42,505	1317,15	2759,95	1442,80	5,5370	0,000019
81	295,85	0,023	43,118	1321,94	2758,50	1436,56	5,5904	0,000020
82	296,71	0,023	43,735	1326,70	2757,03	1430,33	5,6443	0,000020
83	297,56	0,023	44,356	1331,42	2755,54	1424,11	5,6989	0,000020
84	298,40	0,022	44,979	1336,12	2754,03	1417,91	5,7542	0,000020
85	299,24	0,022	45,606	1340,79	2752,50	1411,71	5,8101	0,000020
86	300,07	0,022	46,235	1345,44	2750,97	1405,52	5,8666	0,000020
87	300,89	0,021	46,869	1350,06	2749,41	1399,35	5,9239	0,000020
88	301,71	0,021	47,505	1354,66	2747,84	1393,18	5,9818	0,000020
89	302,51	0,021	48,146	1359,22	2746,25	1387,02	6,0404	0,000020
90	303,31	0,020	48,789	1363,77	2744,64	1380,87	6,0998	0,000020
91	304,11	0,020	49,436	1368,29	2743,02	1374,73	6,1599	0,000020
92	304,89	0,020	50,087	1372,80	2741,39	1368,59	6,2208	0,000020
93	305,67	0,020	50,741	1377,27	2739,73	1362,46	6,2825	0,000020
94	306,45	0,019	51,399	1381,73	2738,07	1356,34	6,3450	0,000020
95	307,22	0,019	52,061	1386,17	2736,38	1350,22	6,4083	0,000020
96	307,98	0,019	52,726	1390,58	2734,69	1344,11	6,4725	0,000020
97	308,73	0,019	53,396	1394,98	2732,98	1338,00	6,5376	0,000020
98	309,48	0,018	54,069	1399,35	2731,24	1331,89	6,6036	0,000020
99	310,22	0,018	54,746	1403,71	2729,50	1325,79	6,6705	0,000020
100	310,96	0,018	55,427	1408,05	2727,74	1319,69	6,7385	0,000020

Приложение Г

Физические свойства водяного пара на линии насыщения

t, °C	$P \cdot 10^5$, Па	ρ^4, кг/м^3	h^4, кДж/кг	C_p, кДж/(кг · К)	λ, Вт/(м · К)	$\nu \cdot 10^6$, м^2/с	Pr
100	1,013	0,598	2675,9	2256,8	2,372	20,02	1,08
110	1,43	0,826	2691,4	2230,0	2,489	15,07	1,09
120	1,98	1,121	2706,5	2202,8	2,593	11,46	1,09
130	2,70	1,496	2720,7	2174,3	2,686	8,85	1,11
140	3,61	1,966	2734,1	2145,0	2,791	6,89	1,12
150	4,76	2,547	2746,7	2114,3	2,884	5,47	1,16
160	6,18	3,258	2758,0	2082,6	3,012	4,39	1,18
170	7,92	4,122	2768,9	2049,5	3,128	3,57	1,21
180	10,03	5,157	2778,5	2015,2	3,268	2,93	1,25
190	12,55	6,397	2786,4	1978,8	3,419	2,44	1,30
200	15,55	7,862	2793,1	1940,7	3,547	2,03	1,36

Приложение Д

Физические свойства сухого воздуха ($P_в$ = 760 мм рт. ст. ≈ 1,01 10^5 Па)

t, °C	ρ кг/м^3	C_p, кДж/(кг · К)	λ, Вт/(м · К)	$\nu \cdot 10^6$, м^2/с	Pr
0	1,293	1,005	2,44	13,28	0,707
10	1,247	1,005	2,51	14,16	0,705
20	1,205	1,005	2,59	15,06	0,703
30	1,165	1,005	2,67	16,00	0,701
40	1,128	1,005	2,76	16,96	0,699
50	1,093	1,005	2,83	17,95	0,698
60	1,060	1,005	2,90	18,97	0,696
70	1,029	1,009	2,96	20,02	0,694
80	1,000	1,009	3,05	21,09	0,692
90	0,972	1,009	3,13	22,10	0,690
100	0,946	1,009	3,21	23,13	0,688
200	0,746	1,026	3,93	34,85	0,68
300	0,615	1,047	4,61	48,33	0,67
400	0,524	1,068	5,21	63,09	0,68
500	0,456	1,093	5,75	79,38	0,69
600	0,404	1,114	6,22	96,89	0,69
700	0,362	1,135	6,71	115,4	0,71

Приложение Е

Справочные данные к контрольной работе

Таблица Е.1 – Средние технологические нагрузки (относительные)

Годовое время использования максимума технологической нагрузки, $h_{тэц}$	**Месяц**											
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**
4300–4600	1,0	0,92	0,81	0,65	0,59	0,57	0,55	0,56	0,63	0,75	0,88	0,95
4700–5000	1,0	0,95	0,89	0,76	0,67	0,61	0,59	0,61	0,67	0,78	0,89	0,96
5000–5300	1,0	0,97	0,92	0,77	0,68	0,64	0,63	0,65	0,71	0,83	0,91	0,97

Таблица Е.2 – Укрупненные показатели максимального теплового потока на отопление жилых зданий (пять этажей и более), q_c, Вт/м^2

Расчетная температура для отопления t_c, °С*	**–5**	**–10**	**–15**	**–20**	**–25**	**–30**	**–35**	**– 40**	**– 45**	**– 50**	**– 55**
Здания постройки до 1985 г.	65	70	77	79	86	88	98	102	109	115	122
То же после 1985 г.	65	67	70	73	81	87	91	95	100	102	108

* ***Примечание:*** для промежуточных значений t_c соответствующие значения q_c определяются интерполяцией.

Таблица Е.3 – Укрупненные показатели среднего теплового потока на горячее водоснабжение жилых и общественных зданий при температуре воды 55 °С $q_г$, Вт/чел.

Средняя за отопительный период норма расхода горячей воды на одного человека в сутки	**л/сут**	**$q_{гВ}$, Вт/чел.**
В жилых домах с душами без ванн	85	320
В жилых домах с сидячими ваннами и душами	95	322
В жилых домах с ваннами длиной 1,5–1,7 м и душами	105	376
В жилых домах высотой более 12 этажей с повышенными требованиями к благоустройству	115	407

Таблица Е.4 – Климатологические данные городов

Город	Температура наружного воздуха, °С			Продолжительность отопительного периода, час	Число часов за отопительный период со среднесуточной температурой наружного воздуха (и ниже), °С												
	расчетная для отопления, t_o	расчетная для вентиляции, $t_в$	средняя за отопительный период		–50	–45	–40	–35	–30	–25	–20	–15	–10	–5	0	5	8
Верхоянск	–59	–51	–25,2	6528	756	1389	2017	2512	2958	3345	3674	4015	4392	4799	5313	5975	6528
Якутск	–55	–45	–21,2	6096	–	587	1094	1617	2190	2652	3075	3485	3879	4333	4856	5368	6096
Братск	–43	–30	–10,3	5904	–	21	96	236	478	861	1343	2021	2752	3439	4214	5143	5904
Красноярск	–40	–22	–7,2	5640	–	–	17	83	212	475	839	1378	2149	3054	3986	5028	5640
Иркутск	–37	–25	–8,9	5784	–	–	7	57	171	454	856	1712	2569	3273	3997	4988	5784
Архангельск	–31	–19	–4,7	6024	–	–	–	27	80	211	439	869	1570	2672	3939	5371	6024
Южно-Сахалинск	–27	–18	–3,3	6744	–	–	–	–	6	38	134	448	1106	2253	3962	5785	6744
Москва	–26	–15	–3,6	4920	–	–	–	–	15	46	167	404	874	1674	2927	4260	4920
Санкт-Петербург	–26	–11	–2,2	5256	–	–	–	–	–	21	83	274	711	1539	2889	4575	5256
Волгоград	–25	–13	–3,4	4368	–	–	–	–	–	13	129	432	954	1692	2873	3921	4368

Таблица Е.5 – Отпуск теплоты от ТЭЦ

№ п/п	Потребители	Нагрузка		
		расчетная		годовая, ГДж
		МВт	ГДж/ч	
1.	Технологические (пар)			
2.	Коммунально-бытовые:			
	отопление			
	вентиляция			
	горячее водоснабжение			
3.	Сантехнические потребители			
4.	Потребители теплоты по сетевой воде			

Таблица Е.6 – Характеристики паровых турбин для промышленно-отопительных ТЭЦ

Тип турбины	Электрическая мощность, МВт		Начальные параметры пара		Расход пара на турбину, кг/с		Номинальная нагрузка отбора		Нагрузка встроенного пучка
	номинальная	максимальная	давление, МПа	температура, °С	номинальная	максимальная	производственного, кг/с	отопительного, МВт	МВт
Т-50/60-130	50	60	13	555	66,7	69,7	–	105	6
Т-110/120-130	110	120	13	555	133	135	–	205	10
Т-185/220-130	185	220	13	555	218	225	–	325	12
ПТ-60/75-130/13	60	75	13	555	97,5	107,5	38,9	61,5	5
ПТ-80/100-130/15	80	100	13	555	124	131	51,4	79	10
ПТ-140/165-130/15	140	160	13	555	205	211	93	134	12
Р-50-130/13	50	60	13	555	103	133	92	–	–
Р-100-130/15	105	107	13	555	218	225	185	–	–

Таблица Е.7 – Характеристики паровых котлов для промышленно-отопительных ТЭЦ

Тип котла	Номинальная паропроизводительность, кг/с	Параметры пара		Температура питательной воды, °С	Топливо	КПД брутто, %
		давление, МПа	температура, °С			
Е-500-140-ГМН	139	14	560	230	Газ, мазут	91,4...94,4
Е-500-140	139	14	560	230	Уголь	92,5
Е-480-140 ГМН	133,3	14	560	230	Газ, мазут	92,1...92,9
Е-420-140 ГМ	11,7	14	560	230	Газ, мазут	93,5...94,7
Е-420-140	116,7	14	560	230	Бурые и камен. угли	91,7...92,1
Е-320-140 ГМ	88,9	14	560	230	Газ, мазут	93,8
Е-320-140	88,9	14	560	230	Бурые и камен. угли	90,0...91,6

Таблица Е.8 – Характеристики пиковых водогрейных котлов

Номинальная величина	Тип котла				Топливо		
	КВ-ГМ-180		КВ-ГМ-100		КВ-ТК-100		
						каменный уголь	
	газ	мазут	газ	мазут	бурый уголь	экибастузский	кузнецкий
Теплопроизводительность, МВт	209	209	116	116	116	116	116
Температура воды, °С							
на входе	110	110	110	110	110	110	110
на выходе	150	150	150	150	150	150	150
КПД котла, %	92,4	89,5	92,5	91,3	88,2	88,7	90,9

Таблица Е.9 – Состав и характеристики оборудования ТЭЦ

Оборудование	**Количество и тип**	**Номинальный расход свежего пара или паропроизводительность, кг/с**	**Номинальный отбор (отпуск)**	
			производственный, кг/с	**отопительный, МВт**
Турбины	k × Т – m × ПТ – n × Р –			
Энергетические котлы	L × Е – L × Еп – L × Пп –			
Водогрейные котлы	f × КВ-ГМ или f × КВ-ТК –			
Редукционно-охладительная установка	РОУ			
Расчетный коэффициент теплофикации	$\alpha_{Р}$ – $\alpha_{СВ}$ –			

Примечания:

1) k, m, n – количество выбранных турбин типа Т, ПТ и Р;

2) L – количество выбранных энергетических котлов типа Е (Еп или Пп);

3) f – количество выбранных водогрейных котлов типа КВ-ГМ или КВ-ТК.

Учебное издание

МАКСИМОВ Виктор Петрович,
МИНЕРВИН Игорь Георгиевич,
ФЕДОРОВ Олег Анатольевич

ОБЩАЯ ЭНЕРГЕТИКА

Практикум для студентов направления
140400.62 «Электроэнергетика и электротехника»

Корректор В. А. Яковлева.
Верстка Г. С. Лосева.

Подписано в печать 05.02.2016. Бумага «Mondi».
Гарнитура «Times New Roman». Формат 60x84 1/16.
Тираж 500 (1-й завод 1–100 экз.). Объем 5 усл. п. л. Заказ № 769-14.

Сахалинский государственный университет
693008, Южно-Сахалинск, ул. Ленина, 290, каб. 32.
Тел. (4242) 45-23-16, факс (4242) 45-23-17.
E-mail: polygraph@sakhgu.ru,
izdatelstvo@sakhgu.ru