

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Российский государственный профессионально-педагогический»
университет
Институт электроэнергетики и информатики
Кафедра автоматизированных систем электроснабжения

ЗАДАНИЯ К КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЕ ПО ДИСЦИПЛИНЕ
«ОСНОВЫ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКИ»
И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ЕЕ ВЫПОЛНЕНИЯ
(ГОС-2000)
для студентов всех форм обучения
специальности 050501.65 Профессиональное обучение
специализации «Электроэнергетика, энергоаудит, энергосбережение»
(030504.19)

Екатеринбург 2011

Задания к контрольной работе по дисциплине «Основы теплоэнергетики» и методические указания для ее выполнения. Екатеринбург, ФГАОУ ВПО «Рос. гос. проф.- пед. ун-т», 2011. 67 с.

Составитель профессор Ю. В. Кузнецов

Одобрены на заседании кафедры автоматизированных систем электроснабжения РГППУ, Протокол от 31.03.2011г. № 8

Заведующая кафедрой _____ С. В. Федорова

Рекомендованы к печати методической комиссией ЭЛИн РГППУ
Протокол от 11.04.2011г. № 5

Председатель МК ЭЛИн _____ С. В. Федорова

© ФГАОУ ВПО «Российский государственный профессионально-педагогический университет», 2011

ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с программой дисциплины «Основы теплоэнергетики» (ГОС 2000) студенты специальности 050501.65 Профессиональное обучение специализации «Электроэнергетика, энергоаудит, энергосбережение» (030504.19) выполняют домашнюю работу, состоящую из пяти контрольных заданий.

Целью выполнения контрольных заданий является закрепление знаний студентов по теоретическим основам теплотехники и приобретение навыков по решению практических задач.

Самостоятельное решение заданий значительно облегчит понимание студентами довольно сложных теоретических разделов «Основ теплоэнергетики». Вариант задания определяется согласно порядковому номеру журнала академической группы.

При выполнении работы необходимо соблюдать требования:

1. Отчет по выполненным заданиям предоставлять в машинописной форме с необходимыми схемами и графиками;
2. Условие задачи переписывать полностью;
3. Указывать основные законы и формулы, применяемые при решении задач, разъяснять буквенные обозначения формул и единицы измерения физических величин;
4. Вычисления выполнять в развернутом виде с требуемой для каждого случая точностью;
5. При выборе данных из учебников или справочной литературы в ходе решения задач необходимо в квадратных скобках давать ссылку на источник, а в конце работы привести список использованной литературы.

Отчеты, выполненные не по варианту задания, а также без соблюдения указанных выше требований, не принимаются.

1. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАДАНИЯ 1

ГАЗОВЫЕ ПРОЦЕССЫ И ЦИКЛЫ

Основными уравнениями для расчета процессов в газовом цикле являются:

- Уравнение состояния для 1 кг газа (уравнение Клайперона)

$$pv = RT \quad (1)$$

- Уравнение первого закона термодинамики

$$dq = du + dl$$

или

$$dq = c_v dT + Pdv, \quad (2)$$

Где P – давление, Па; T – температура, К; v – удельный объем, м³/кг; c_v – изохорная теплоемкость, Дж/(кг·К); q – удельная теплота, подведенная или отведенная в процессе, Дж/кг; u – удельная внутренняя энергия, Дж/кг; l – удельная работа расширения (сжатия) газа, Дж/кг; R – газовая постоянная, Дж/(кг·К).

Характеристика термодинамических процессов дана в таблицах 1 и 2.

Изменение энтропии s , Дж/(кг·К) в газовых процессах вычисляется по формулам идеального газа:

$$s_2 - s_1 = c_v \ln(T_2/T_1) + R \ln(v_2/v_1),$$

$$s_2 - s_1 = c_p \ln(T_2/T_1) - R \ln(P_2/P_1),$$

$$s_2 - s_1 = c_v \ln(P_2/P_1) + c_p \ln(v_2/v_1).$$

Изображение основных термодинамических процессов идеального газа в v -, P и S -, T координатах даны на рисунке 1.

Таблица 1 - Характеристика термодинамических процессов

Процесс, уравнение	Зависимость между параметрами	Работа процесса расширения l , Дж/кг	Теплота, подведенная в процессе q , Дж/кг	Вид основного уравнения термодинамики
Изохорный $v = \text{const}$	$\frac{p_2}{p_1} = \frac{T_2}{T_1}$	$l = 0$	$q = c_v(T_2 - T_1)$	$q = \Delta u$
Изобарный $p = \text{const}$	$\frac{v_2}{v_1} = \frac{T_2}{T_1}$	$l = p(v_2 - v_1)$ $l = R(T_2 - T_1)$	$q = c_p(T_2 - T_1)$	$q = \Delta u + 1$
Изотермический $T = \text{const}$	$\frac{p_2}{p_1} = \frac{v_1}{v_2}$	$l = p_1 v_1 \ln \frac{p_2}{p_1}$	$q = l$	$q = l$

		$l = RT_1 \ln \frac{v_2}{v_1}$		
Адиабатный, $pv^k = \text{const}$	$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{k-1}$ $\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}$ $\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^k$	$l = \frac{(p_1 v_1 - p_2 v_2)}{(k-1)}$ $l = \frac{RT_1}{(k-1)} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} \right]$	$q = 0$	$l = -\Delta u$
Политропный, $pv^n = \text{const}$	$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{n-1}$ $\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}$ $\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^n$	$l = \frac{(p_1 v_1 - p_2 v_2)}{(n-1)}$ $l = \frac{RT_1}{(n-1)} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} \right]$	$q = c_n (T_2 - T_1)$ $c_n = c_v \frac{n-k}{n-1}$	$q = \Delta u + 1$

Таблица 2 - Значение располагаемой работы для различных процессов сжатия «1-2»

Процесс	Формула
Политропный процесс с любым значением показателя политропы n	$l_{пол} = \frac{n}{n-1} p_1 v_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]$
Изотропный процесс, n=k	$l_{ад} = \frac{k}{k-1} p_1 v_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]$
Изотермический процесс, n=1	$l_{из} = p_1 v_1 \ln \frac{p_2}{p_1}$

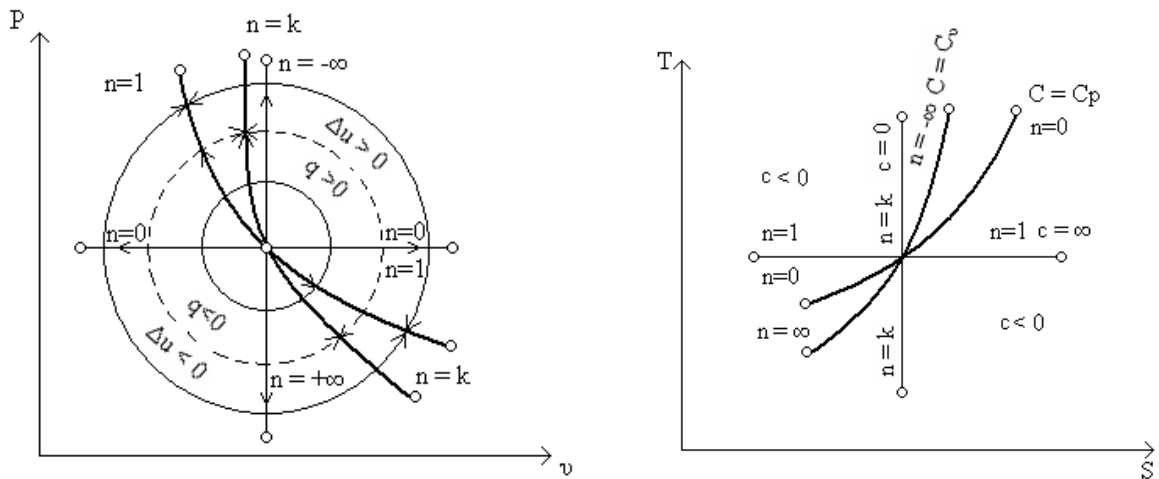


Рисунок 1- Изображение основных термодинамических процессов идеального газа в v -, P и s -, T координатах

Задание 1

Рассчитать основные параметры газового цикла по данным рисунка 2.

1. определить значения давления P , удельного объема v , температуры T , внутренней энергии u , энтропии s , энтальпии h для основных точек цикла;
2. найти изменения внутренней энергии Δu , энтропии Δs , количество теплоты q и работы l для каждого процесса, входящего в состав цикла;
3. определить теплоту, работу цикла и термический коэффициент полезного действия η_t цикла.

По точкам построить цикл в координатах v -, P и s -, T .

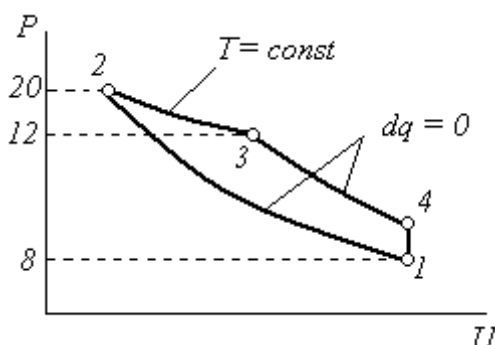
В качестве дополнительных исходных данных рекомендуется

принять:

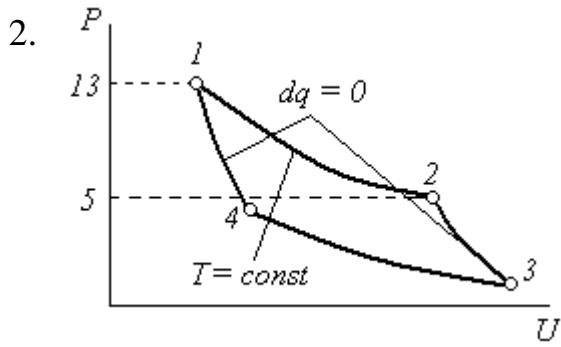
- значение газовой постоянной $R=287$ Дж/(кг·град)
- теплоемкость при постоянном давлении $c_p=1,005$ кДж/(кг·град)
- теплоемкость при постоянном объеме $c_v=0,718$ кДж/(кг·град)
- значение энтропии в точке 1 цикла, $s_1=0$.

Варианты заданий по газовым циклам.

1.



$$\begin{aligned}
 P_{1abc} &= 0,8 \text{ МПа} \\
 P_{2abc} &= 2 \text{ МПа} \\
 P_{3abc} &= 1,2 \text{ МПа} \\
 v_1 &= 0,12 \text{ м}^3/\text{кг}
 \end{aligned}$$

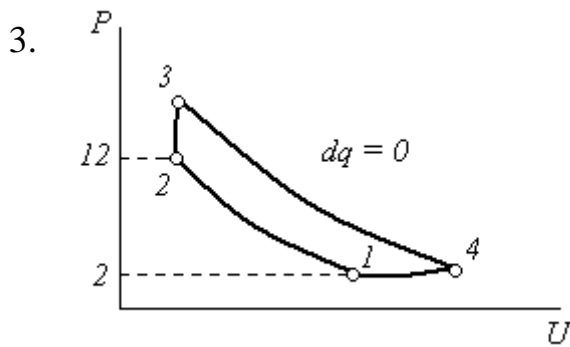


$$P_{1a\delta c} = 1,3 \text{ МПа}$$

$$P_{2a\delta c} = 0,5 \text{ МПа}$$

$$t_3 = 17 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$t_1 = 300 \text{ }^\circ\text{C}$$

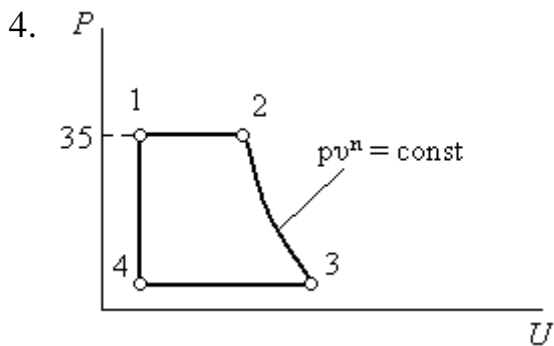


$$P_{1a\delta c} = 0,2 \text{ МПа}$$

$$P_{2a\delta c} = 1,2 \text{ МПа}$$

$$v_1 = 0,45 \text{ м}^3/\text{кг}$$

$$t_3 = 300 \text{ }^\circ\text{C}$$



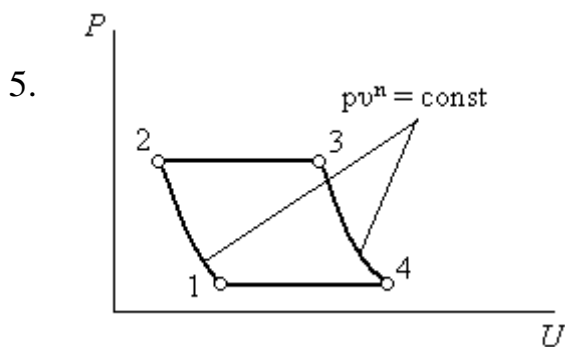
$$P_{1a\delta c} = 3,5 \text{ МПа}$$

$$P_{3a\delta c} = 2,5 \text{ МПа}$$

$$t_1 = 210 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$t_2 = 310 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$n = 1,2$$



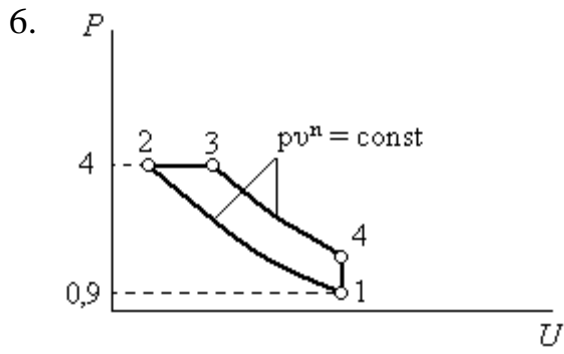
$$P_{1a\delta c} = 0,1 \text{ МПа}$$

$$P_{2a\delta c} = 0,5 \text{ МПа}$$

$$t_1 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$t_3 = 200 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$n = 1,3$$



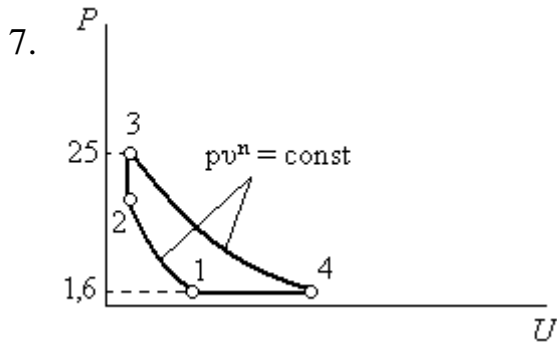
$$P_{1a\delta c} = 0,09 \text{ МПа}$$

$$P_{2a\delta c} = 0,4 \text{ МПа}$$

$$t_1 = 30 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$t_3 = 200 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$n = 1,2$$



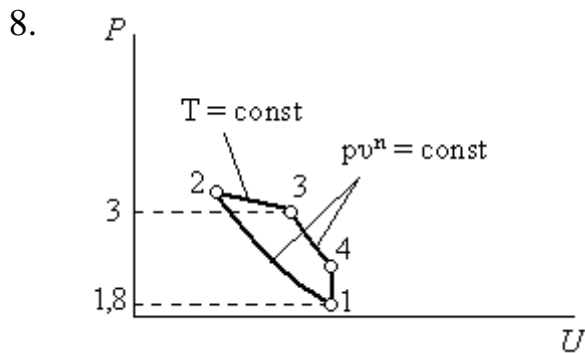
$$P_{1a\delta c} = 0,16 \text{ МПа}$$

$$P_{3a\delta c} = 2,5 \text{ МПа}$$

$$t_2 = 150 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$v_1 = 0,5 \text{ м}^3/\text{кг}$$

$$n = 1,2$$



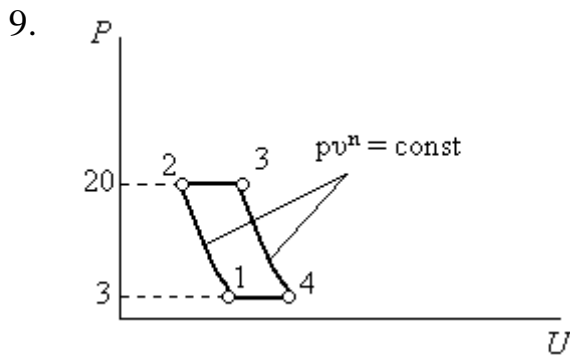
$$P_{1a\delta c} = 0,18 \text{ МПа}$$

$$P_{3a\delta c} = 0,3 \text{ МПа}$$

$$v_2 = 0,1 \text{ м}^3/\text{кг}$$

$$t_1 = 30 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$n = 1,1$$



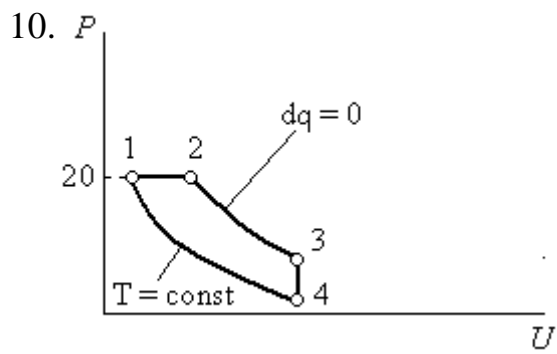
$$P_{1a\delta c} = 0,3 \text{ МПа}$$

$$P_{2a\delta c} = 2 \text{ МПа}$$

$$v_1 = 0,3 \text{ м}^3/\text{кг}$$

$$n = 1,3$$

$$t_3 = 300 \text{ } ^\circ\text{C}$$

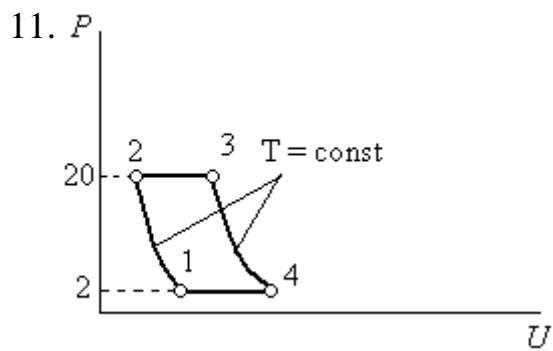


$$P_{1a\delta c} = 2 \text{ MPa}$$

$$t_1 = 200 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$t_2 = 350 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$v_4 = 0,12 \text{ m}^3/\text{kg}$$

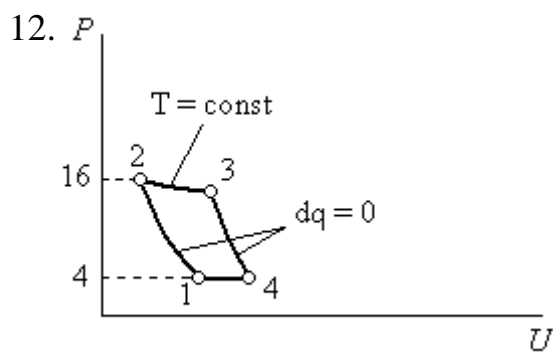


$$P_{1a\delta c} = 0,2 \text{ MPa}$$

$$P_{2a\delta c} = 2 \text{ MPa}$$

$$t_1 = 50 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$t_3 = 200 \text{ }^\circ\text{C}$$

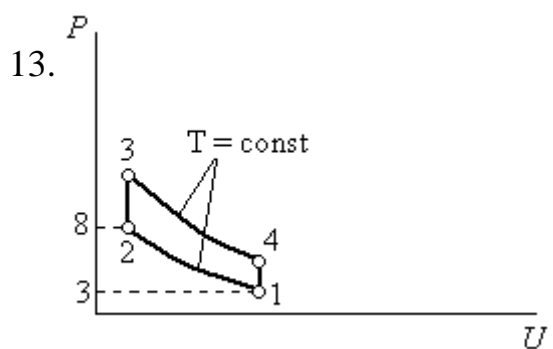


$$P_{1a\delta c} = 0,4 \text{ MPa}$$

$$P_{2a\delta c} = 1,6 \text{ MPa}$$

$$P_{3a\delta c} = 0,6 \text{ MPa}$$

$$t_1 = 100 \text{ }^\circ\text{C}$$

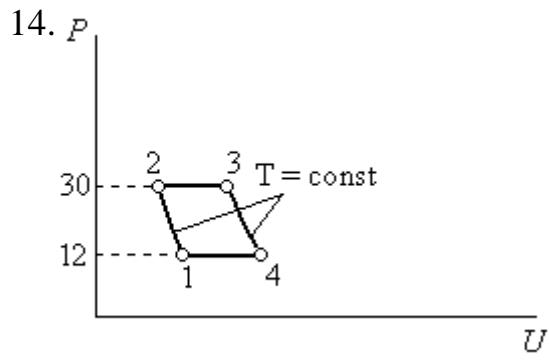


$$P_{1a\delta c} = 0,3 \text{ MPa}$$

$$P_{2a\delta c} = 0,8 \text{ MPa}$$

$$t_1 = 27 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$t_3 = 200 \text{ }^\circ\text{C}$$

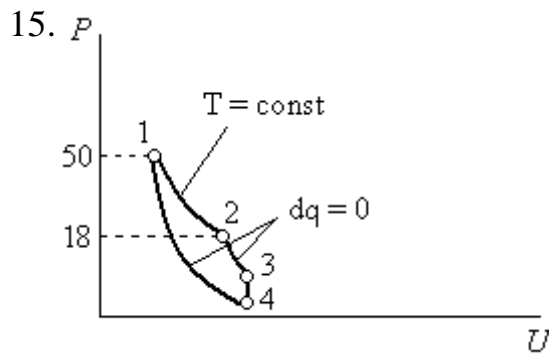


$$P_{1a6c} = 1,2 \text{ MPa}$$

$$P_{2a6c} = 3 \text{ MPa}$$

$$t_1 = 100 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$t_3 = 200 \text{ } ^\circ\text{C}$$

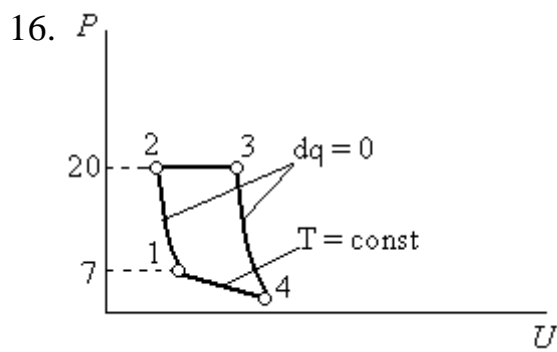


$$P_{1a6c} = 5 \text{ MPa}$$

$$P_{2a6c} = 1,8 \text{ MPa}$$

$$t_1 = 300 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$v_3 = 0,2 \text{ m}^3/\text{kg}$$

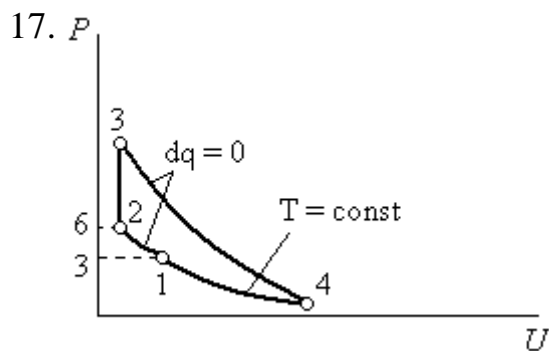


$$P_{1a6c} = 0,7 \text{ MPa}$$

$$P_{2a6c} = 2 \text{ MPa}$$

$$v_1 = 0,12 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$t_3 = 200 \text{ } ^\circ\text{C}$$

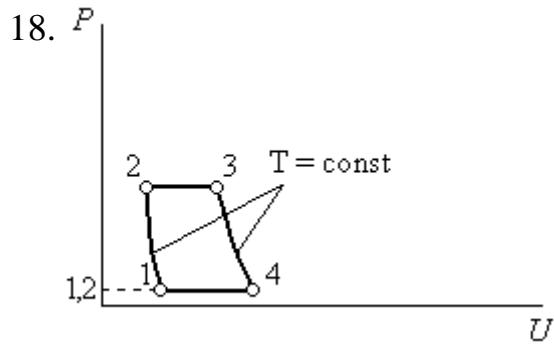


$$P_{1a6c} = 0,3 \text{ MPa}$$

$$P_{2a6c} = 0,6 \text{ MPa}$$

$$t_1 = 30 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$t_3 = 250 \text{ } ^\circ\text{C}$$

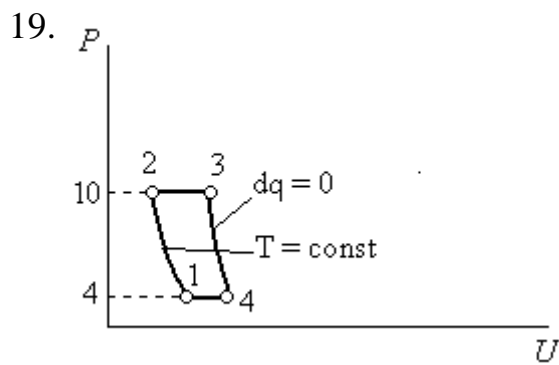


$$P_{1a\delta c} = 1,2 \text{ MPa}$$

$$v_1 = 0,7 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$v_2 = 0,2 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$t_3 = 150 \text{ }^\circ\text{C}$$

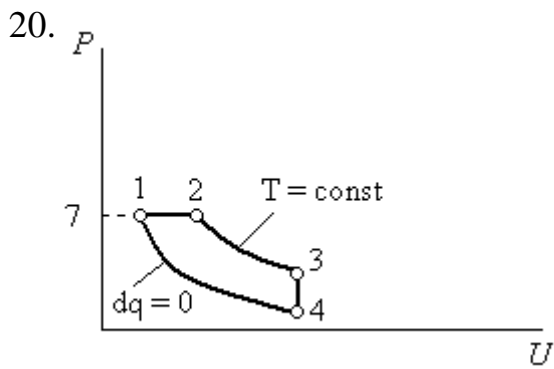


$$P_{1a\delta c} = 0,4 \text{ MPa}$$

$$P_{2a\delta c} = 1 \text{ MPa}$$

$$v_1 = 0,3 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$t_3 = 300 \text{ }^\circ\text{C}$$

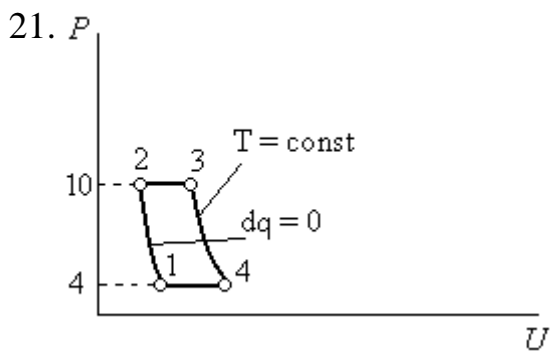


$$P_{1a\delta c} = 0,7 \text{ MPa}$$

$$t_1 = 200 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$t_2 = 300 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$v_4 = 0,4 \text{ m}^3/\text{kg}$$



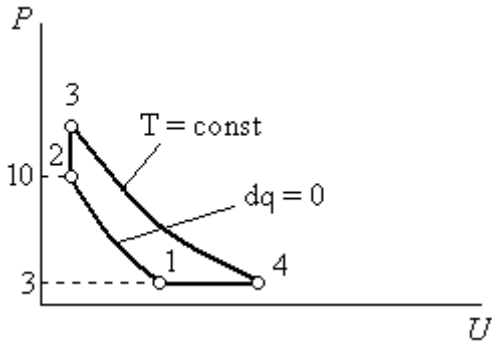
$$P_{1a\delta c} = 0,3 \text{ MPa}$$

$$P_{2a\delta c} = 1 \text{ MPa}$$

$$t_1 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$t_3 = 250 \text{ }^\circ\text{C}$$

22.



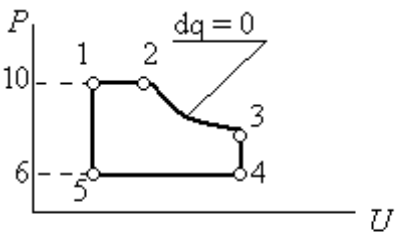
$$P_{1a6c} = 0,3 \text{ МПа}$$

$$P_{2a6c} = 1 \text{ МПа}$$

$$v_1 = 0,3 \text{ м}^3/\text{кг}$$

$$t_3 = 200 \text{ }^\circ\text{C}$$

23.



$$P_{1a6c} = 1 \text{ МПа}$$

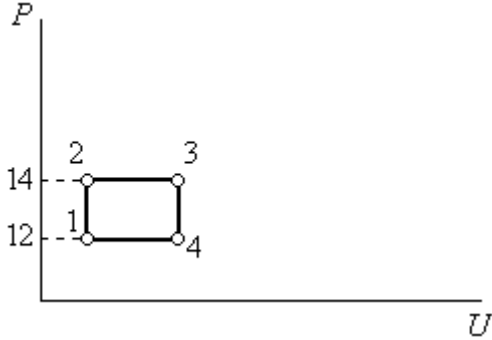
$$P_{4a6c} = 0,6 \text{ МПа}$$

$$t_1 = 250 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$t_2 = 300 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$v_3 = 0,2 \text{ м}^3/\text{кг}$$

24.



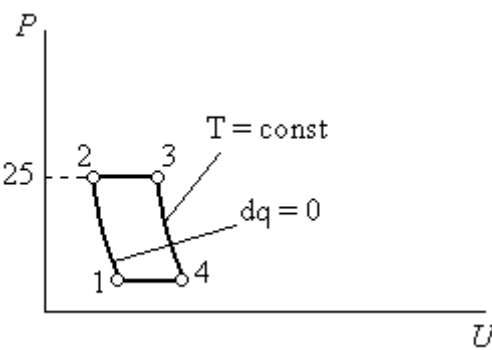
$$P_{1a6c} = 1,2 \text{ МПа}$$

$$P_{2a6c} = 1,4 \text{ МПа}$$

$$t_3 = 150 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$v_1 = 0,08 \text{ м}^3/\text{кг}$$

25.



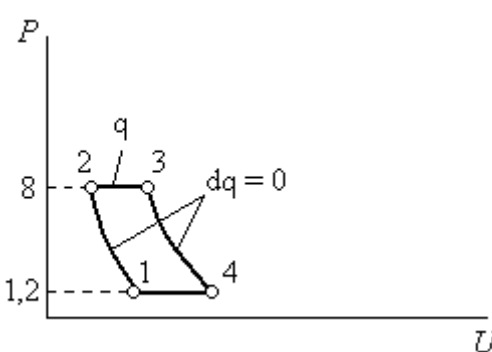
$$P_{2a6c} = 2,5 \text{ МПа}$$

$$t_1 = 50 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$t_3 = 300 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$v_1 = 0,12 \text{ м}^3/\text{кг}$$

26.

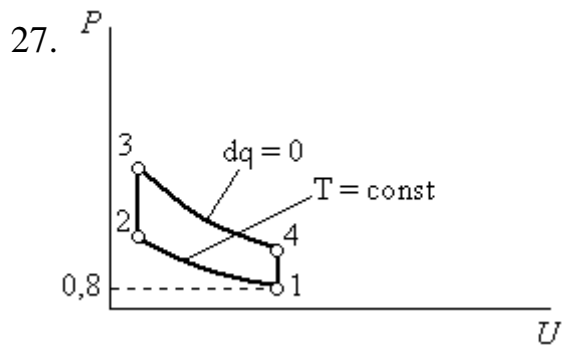


$$P_{1a6c} = 0,12 \text{ МПа}$$

$$P_{2a6c} = 0,8 \text{ МПа}$$

$$t_1 = 10 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$q = 24 \text{ ккал/кг}$$

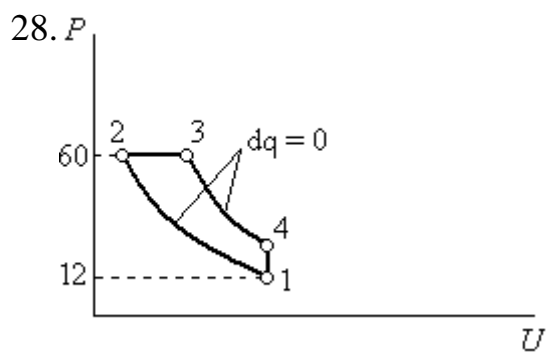


$$P_{1a6c} = 0,08 \text{ МПа}$$

$$t_1 = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$t_3 = 300 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$v_2 = 0,4 \text{ м}^3/\text{кг}$$

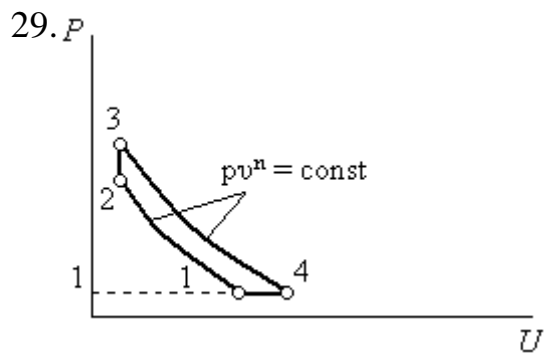


$$P_{1a6c} = 1,2 \text{ МПа}$$

$$P_{2a6c} = 6 \text{ МПа}$$

$$t_1 = 50 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$t_3 = 320 \text{ } ^\circ\text{C}$$



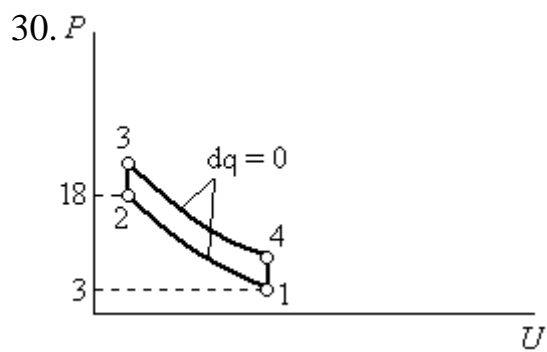
$$P_{1a6c} = 0,1 \text{ МПа}$$

$$t_1 = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$t_2 = 160 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$t_4 = 65 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$n = 1,3$$



$$P_{1a6c} = 0,3 \text{ МПа}$$

$$P_{2a6c} = 1,8 \text{ МПа}$$

$$t_1 = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$t_3 = 330 \text{ } ^\circ\text{C}$$

2. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАДАНИЯ 2 ПРОЦЕССЫ ВОДЯНОГО ПАРА

Диаграмма s -, h позволяет определять параметры пара и проводить расчёты процессов водяного пара с достаточной точностью.

Структура диаграммы s -, h показана на рис. 2.1. За начало координат $h=0$ и $s=0$ принято состояние воды в тройной точке. Диаграмма состоит из двух зон, соответствующих параметрам состояния влажного и перегретого паров и разделяющих их верхней пограничной кривой – линии сухого насыщенного пара (на рис. 2.1 – линия насыщения со степенью сухости пара $x=1$). Изобары в области влажного насыщенного пара являются одновременно изотермами. При переходе в зону перегретого пара изобары и изотермы расходятся, и каждая из них представляет собой отдельную кривую. На диаграмме нанесены также изохоры (пунктирные кривые) и линии сухости пара $x=\text{const}$.

Рассмотрим расчет наиболее типичных процессов водяного пара, используя s -, h диаграмму.

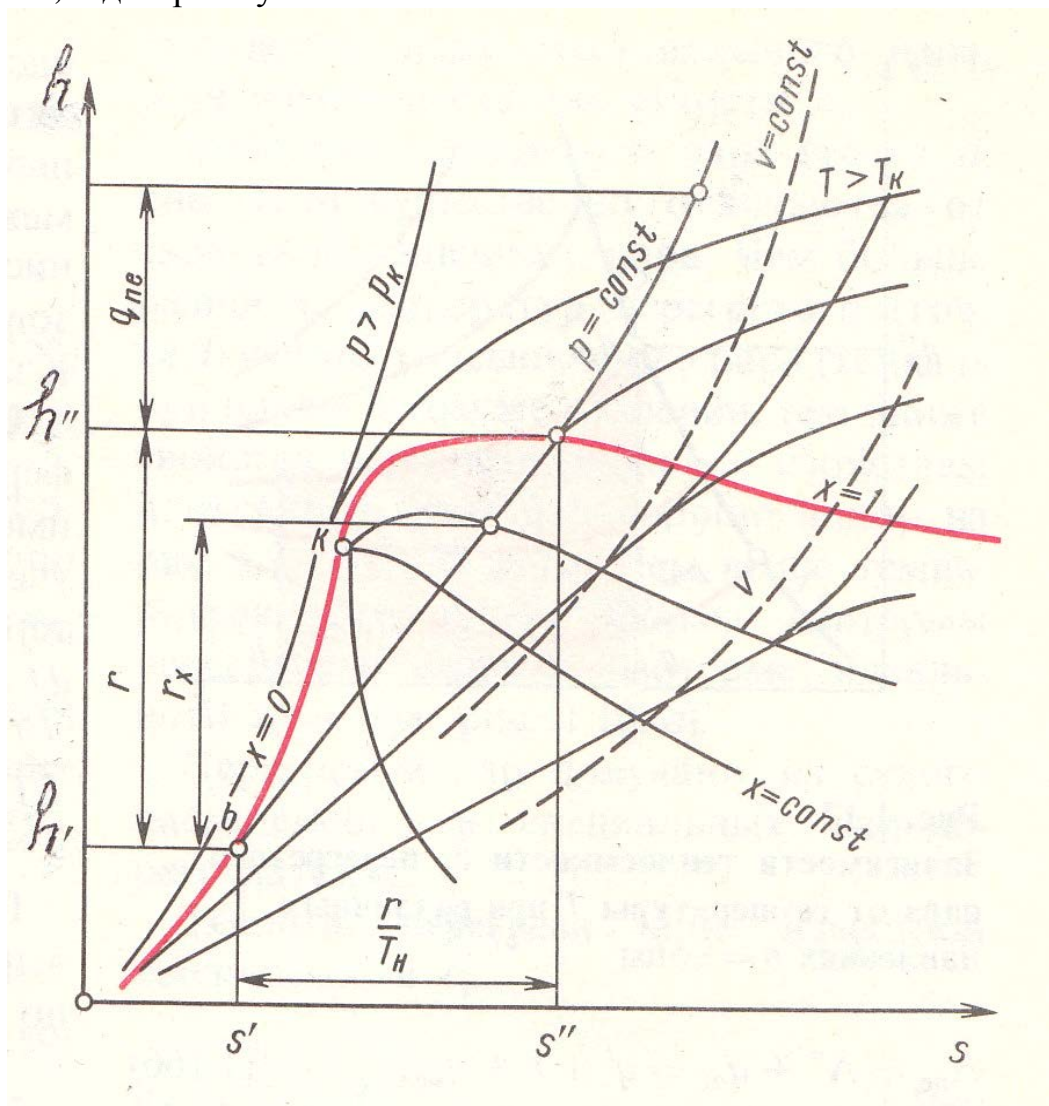
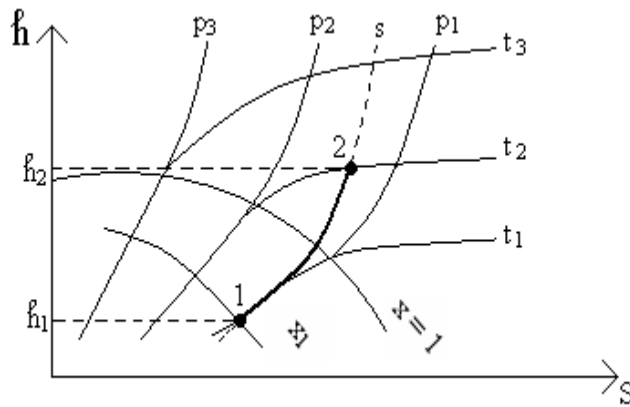


Рис 2.1 – s -, h диаграмма водяного пара

Изохорный процесс ($v=const$).



Если известно, что в изохорном процессе начальное состояние пара характеризуется параметрами: давлением p_1 и степенью сухости пара x_1 ; а конечное- температурой t_2 , то этот процесс изображается на диаграмме (рисунок 4) отрезком 1 и 2 на кривой изохоры $v=const$. По расположению т.т. 1 и 2 определяют все параметры пара в начале и в конце процесса.
 ($p_1; v_1; t_1; h_1; s_1; p_2; v_2; t_2; h_2; s_2$).

Рис. 2.2

График процесса показывает, что при подводе тепла к влажному насыщенному пару вначале происходит его подсушка, а в дальнейшем перегрев при непрерывном возрастании давления и температуры.

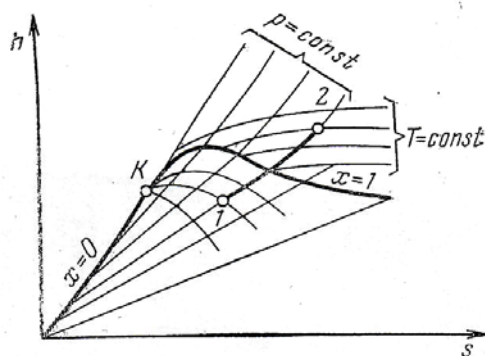
По первому закону термодинамики:

$$dq = du, \text{ так как } dl = 0 \text{ или } q = \Delta u.$$

Зная параметры пара в точках 1 и 2, теплообмен с внешним источником подсчитывается по формуле:

$$q = \Delta u = (h - pv)_2 - (h - pv)_1, \text{ кДж/кг.}$$

Изобарный процесс ($p=const$).



Если допустить, что в изобарном процессе начальное и конечное состояние пара определяется параметрами p, x_1 и t_2 , то этот процесс изобразится на графике (рисунок 5) отрезком 1-2 на кривой изобары.

По расположению точек 1 и 2 определяют все параметры пара в начале и конце процесса ($p; v_1; t_1; h_1; s_1; v_2; t_2; h_2; s_2$).

Рис. 2.3

При изобарном расширении пара вначале происходит его подсушка, а затем перегрев. Изобарный процесс происходит, например, в котлах.

Количество тепла, участвующего в изобарном процессе, определяется по уравнению:

$$q_p = h_2 - h_1.$$

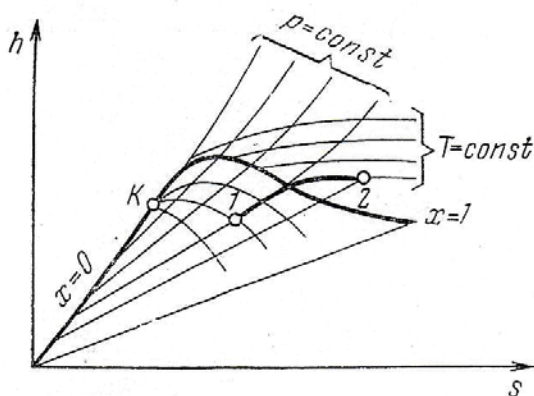
Работа в этом процессе:

$$l = p(v_2 - v_1) \text{ или } l = d - \Delta u.$$

Изменение внутренней энергии пара определяется по формуле:

$$\Delta u = u_2 - u_1 = (h - pv)_2 - (h - pv)_1.$$

Изотермический процесс.



В области влажного пара кривая изотермы совпадает с кривой изобары (рисунок б).

Допустим, что в изотермическом процессе начальное и конечное состояние пара определяется параметрами: p , x_1 и p_2 .

Теплообмен с внешней средой определится из математической записи второго закона термодинамики:

Рис. 2.4

$$q = T(s_2 - s_1) = (t + 273,15)(s_2 - s_1),$$

или по первому закону термодинамики:

$$q = \Delta u + l,$$

отсюда работа пара:

$$l = q - \Delta u.$$

Изменение внутренней энергии пара определяется

$$\Delta u = u_2 - u_1 = (h - pv)_2 - (h - pv)_1.$$

Адиабатный процесс.

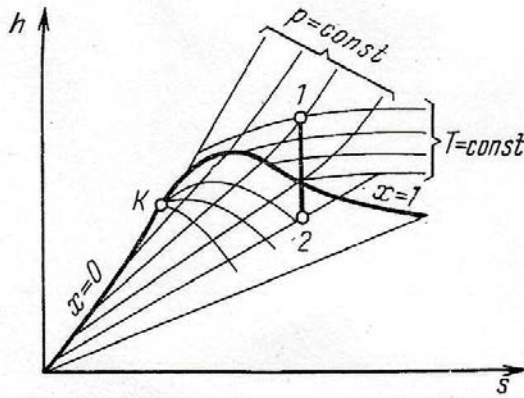


Рис. 2.5

Допустим, что при адиабатном расширении пара начальное и конечное состояние его определяется параметрами: p , t_1 и p_2

Процесс расширения изобразится прямой, параллельной оси ординат, отрезком 1-2 (рисунок 7).

При адиабатном расширении перегретого пара вначале происходит уменьшение его степени перегрева, а затем переход в сухой насыщенный и во влажный насыщенный пар со степенью сухости x_2 .

Работа пара происходит за счет внутренней энергии:

$$l = u_1 - u_2 = (h - p\nu)_1 - (h - p\nu)_2.$$

Рассмотрим расчёт процессов водяного пара с использованием таблиц водяного пара (см. приложение табл.1).

Состояние влажного насыщенного пара определяется его давлением или температурой и степенью сухости x . Очевидно, значение $x=0$ соответствует воде в состоянии кипения, а $x=1$ – сухому насыщенному пару.

Удельный объем влажного пара зависит от давления и от степени сухости и определяется из уравнения:

$$\nu_x = \nu'' \cdot x + (1 - x)\nu'; \quad (3)$$

где:

ν' - удельный объем кипящей воды, $\text{м}^3/\text{кг}$;

ν'' - удельный объем сухого насыщенного пара, $\text{м}^3/\text{кг}$;

x – степень сухости пара.

Из этой формулы получаем значение x :

$$x = \frac{\nu_x - \nu'}{\nu'' - \nu'}. \quad (4)$$

Плотность влажного пара определяется из равенства:

$$\rho_x = \frac{1}{\nu_x} = \frac{1}{\nu'' \cdot x + (1 - x)\nu'}.$$

Перегретый пар имеет более высокую температуру t по сравнению с температурой t_n сухого насыщенного пара того же давления. Разность температур перегретого и насыщенного пара того же давления $t - t_n$ называют перегревом пара.

Энтальпия h'' сухого насыщенного пара определяется по формуле:

$$h'' = h' + r, \quad (5)$$

где:

h' - энтальпия кипящей воды, кДж/кг;

r - теплота парообразования, кДж/кг.

Для влажного насыщенного пара значение его энтальпии равно:

$$h_x = h' + r \cdot x. \quad (6)$$

Количество тепла, необходимого для перегрева 1 кг сухого насыщенного пара в перегретый при постоянном давлении, называют теплотой перегрева.

Очевидно,

$$q_{II} = \int_{T_H}^T c_p \cdot dt,$$

где c_p - истинная массовая теплоемкость перегретого пара при постоянном давлении.

Теплота перегрева может быть найдена из выражения:

$$q_{II} = h - h',$$

где h - энтальпия перегретого пара, кДж/кг.

Изменение внутренней энергии пара определяется из выражений:

$$u'' = h'' - p v'' - \text{ для сухого насыщенного пара;} \quad (7)$$

$$u_x = h_x - p v_x - \text{ для влажного насыщенного пара;} \quad (8)$$

$$u = h - p v - \text{ для перегретого пара.} \quad (9)$$

Энтропия водяного пара отсчитывается от условного нуля, в качестве которого принимают энтропию воды при $0,01^\circ\text{C}$ и при давлении насыщения, соответствующем этой температуре, т.е. при давлении $0,006108$ бар ($0,006228$ ат).

Энтропия жидкости s' определяется из выражения:

$$s' = c \ln \frac{T_H}{273}, \quad (10)$$

где c - теплоемкость воды;

T_H - температура насыщения в °К.

Энтропия сухого насыщенного пара s'' определяется из уравнения:

$$s'' = s' + \frac{r}{T_H}, \quad (11)$$

где r - теплота парообразования.

Энтропия влажного насыщенного пара определяется как

$$s_x = s' + \frac{r}{T_H} x \quad \text{или} \quad s_x = s' + (s'' - s')x, \quad (12)$$

где x – степень сухости пара.

Энтропия перегретого пара может быть найдена из уравнения:

$$s = s'' + \int_{T_H}^T c_p \frac{dT}{T}. \quad (13)$$

Варианты заданий 2

2.1 Найти затраченное тепло, работу и изменение внутренней энергии в процессе $p=30 \text{ бар} = \text{const}$, если в начале процесса пар имел влажность 11 %, а в конце стал перегретым и его температура повысилась до 500°C . Какой процент тепла был затрачен на первоначальном участке процесса, в конце которого пар превратился в сухой насыщенный?

2.2 В сосуде неизменной емкости находится 1 кг пара с давлением $p=30 \text{ бар}$ и температурой 600°C . От пара отводится 400 кДж тепла. До каких значений упадут давление и температура пара внутри сосуда?

2.3 Влажный пар, имеющий давление $p=10 \text{ бар}$ и влажность 10%, сначала подсушивается до сухого насыщенного состояния, а затем перегревается до 300°C . Каковы значения средних изобарных теплоемкостей на обоих участках процесса?

2.4 Сколько надо затратить тепла, чтобы сухой насыщенный пар, занимающий объем $0,05 \text{ м}^3/\text{кг}$, нагреть при постоянном объеме до 650°C ? Во сколько раз при этом возрастет давление пара?

2.5 Сухой насыщенный пар при постоянном давлении $p=10 \text{ бар}$ сначала перегревается до 600°C , а затем при неизменном объеме вновь охлаждается до сухого насыщенного состояния. Найти изменения энтальпии, внутренней энергии и энтропии в рассматриваемом сложном процессе по величине и знаку.

2.6 Перегретый пар с начальным давлением $p=1 \text{ бар}$ температурой 250°C сжимается по изотерме и в конце процесса становится влажным с 15% влаги. Найти отводимое тепло, изменение внутренней энергии и работу, затрачиваемую на сжатие.

2.7 Влажный пар, имеющий давление $p=20 \text{ бар}$ и влажность 20%, расширяется при неизменной температуре до сухого насыщенного состояния. Найти теплообмен с окружающей средой и изменение внутренней энергии по величине и знаку. Разъяснить, почему происходит изменение внутренней энергии.

2.8 Какова работа процесса и располагаемая работа l_0 , если происходит процесс адиабатного сжатия сухого насыщенного пара давлением $p_1=3 \text{ бар}$ до конечного давления $p_2=50 \text{ бар}$? Определить конечную температуру пара.

2.9 Процесс протекает при неизменной сухости пара $x=90\%$, от давления $p_1=20$ бар до давления $p_2=1$ бар. Найти участвующие в процессе тепло, изменение внутренней энергии и работу пара по величине и знаку.

2.10 Пар совершает сложный процесс:

1) сначала, будучи влажным с $p_1=50$ бар и $x_1=0,85$, расширяется по изотерме до $p_2=5$ бар;

2) затем охлаждается при постоянном давлении до первоначальной влажности.

Найти для этого процесса теплообмен с внешней средой, изменение внутренней энергии и работу по величине и знаку.

2.11 Перегретый пар с $p_1=20$ бар и $t_1=400$ °С сначала расширяется по адиабате до сухого насыщенного состояния, а вслед затем охлаждается до температуры 115 °С при неизменном объеме. Определить для этого процесса теплообмен с внешней средой, работу процесса и располагаемую работу.

2.12 При изотермическом сжатии 1 кг перегретого пара, имеющего вначале $p_1=3$ бар и $t_1=300$ °С, отводится 420 кДж тепла. Какого давление в конце сжатия и насколько уменьшилась внутренняя энергия пара? Найти также затраченную работу на сжатие пара.

2.13 В закрытом сосуде содержится 1 м³ сухого насыщенного водяного пара при давлении 10 бар. Определить давление, степень сухости пара и количество отданного им тепла, если он охладился до температуры 60 °С.

2.14 Определить количество тепла, которое нужно сообщить 6 кг водяного пара, занимающего объем 0,6 м³ при давлении 6 бар, чтобы при $v=const$ повысить его давление до 10 бар; найти также конечную степень сухости пара.

2.15 1 м³ пара при давлении $p=10$ бар и температуре $t=300$ °С охлаждается при постоянном объеме до 100 °С.

Определить количество тепла, отданного паром.

2.16 В баллоне емкостью 1 м³ находится пар при $p=1$ бар и $x=0,78$.

Сколько тепла нужно сообщить баллону, чтобы пар сделался сухим насыщенным?

2.17 влажный пар имеет при давлении $p=15$ бар паросодержание $x=0,80$.

Какое количество тепла нужно сообщить 1 кг данного пара, чтобы довести его степень сухости при постоянном давлении до $x=0,95$.

2.18 Влажный пар имеет давление $p=8$ бар степень сухости $x=0,9$.

Какое количество тепла нужно сообщить 1 кг этого пара, чтобы перевести его при постоянном давлении в сухой насыщенный пар?

2.19 1 кг водяного пара при $p=10$ и $t=240^\circ\text{C}$ нагревается при постоянном давлении до 320°C .

Определить затраченное количество тепла, работу расширения и изменение внутренней энергии пара.

2.20 1 кг водяного пара при $p=16$ бар и $t=300^\circ\text{C}$ нагревается при постоянном давлении до 400°C .

Определить затраченное количество тепла, работу расширения и изменение внутренней энергии пара.

2.21 Энтальпия влажного насыщенного пара при давлении $p_1 = 14$ бар составляет $h_x = 2795$ кДж/кг.

Как изменится степень сухости пара, если к 1 кг его будет подведено 40 кДж тепла при постоянном давлении?

2.22 К 1 кг пара при давлении 8 бар и степени влажности 70% подводится при постоянном давлении 820 кДж тепла.

Определить степень сухости, объем и энтальпию пара в конечном состоянии.

2.23 1 кг влажного пара при давлении 18 бар и степени влажности 3% перегревается при постоянном давлении до $t=400^\circ\text{C}$.

Определить работу расширения, количество сообщенного тепла и изменение внутренней энергии пара.

2.24 1 м³ водяного пара при давлении $p=10$ бар и $x=0,65$ расширяется при $p=const$ до тех пор, пока его удельный объем не станет равным $v=0,19$ м³/кг.

Определить конечные параметры, количества тепла, участвующего в процессе, работу и изменение внутренней энергии.

2.25 1кг пара при давлении $p=6$ и $t=200^\circ\text{C}$ сжимают изотермически до конечного объема $v=0,11$ м³/кг.

Определить конечные параметры и количества тепла, участвующего в процессе.

2.26 6 кг пара при давлении $p=10$ бар степени сухости $x=0,505$ расширяются изотермически так, что в конце расширения пар оказывается сухим насыщенным.

Определить количества тепла, сообщенного пару, произведенную им работу и изменение внутренней энергии.

2.27 $1,2 \text{ м}^3$ влажности пара со степенью сухости $x=0,8$ расширяется адиабатно от 4 до 0,6 бар.

Определить степень сухости, объем пара в конце расширения и произведенную им работу.

2.28 Пар при давлении 18 бар и температуре 350°C расширяется адиабатно до конечного давления 0,08 бар.

Определить степень сухости в конце процесса и давление, при котором пар в процессе расширения окажется сухим насыщенным.

2.29 Пар с начальным давлением 20 бар и температуре 300°C расширяется адиабатно до давления 0,04 бар.

Определить начальные и конечные параметры и работу расширения 1 кг пара.

2.30 5 кг водяного пара, параметры которого 20 бар и объем $0,5 \text{ м}^3$, расширяются адиабатно до давления 2 бар.

Определить конечный объем пара, степень сухости его и произведенную им работу.

3. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАДАНИЯ 3 ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ

Теплообмен широко распространен в природе и технике. Существует три различных по своей природе элементарных видов теплообмена: теплопроводность, конвективный теплообмен (конвекция) и лучистый теплообмен.

Теплопроводность – молекулярный перенос тепла в сплошной среде, обусловленный наличием градиента температур.

Конвекция – перенос теплоты, обусловленный перемещением макроскопических элементов среды в пространстве, сопровождаемый теплопроводимостью.

Лучистый теплообмен между телами, в отличие от теплопроводности и конвекции, может осуществляться и при отсутствии промежуточной среды, например, в вакууме. Он обусловлен только температурой и оптическими свойствами тел, участвующих в теплообмене. В реальных условиях все три вида теплообмена, как правило, протекают одновременно.

Основной задачей теплопроводности является определение температурного поля в теле, которое может быть стационарным, когда температура во всех точках тела не зависит от времени, и нестационарным. Кроме того, если температура изменяется только по одной координате, то оно называется одномерным.

Большинство практических задач решаются при условии стационарного теплообмена, когда энергия не расходуется на нагрев, плотность теплового потока неизменна и температурное поле одномерное.

Рассмотрим перенос теплоты теплопроводности при стационарном режиме для трех практически важных случаев: через однородную неограниченную плоскую, бесконечно длинную цилиндрическую и сферическую стенку. Для таких простейших задач получены расчетные формулы по определению плотности теплового потока и распределение температуры по толщине стенки.

Однородная плоская стенка.

Плотность теплового потока

$$q = (t_{c1} - t_{c2})\lambda / \delta, \text{ Вт/м}^2, \quad (14)$$

где

t_{c1} и t_{c2} - температуры на поверхностях стенки, которые поддерживаются постоянными, °С;

δ - толщина стенки, м;

λ - коэффициент теплопроводности стенки, Вт/(м·К).

В большинстве практических задач приближенно предполагается, что λ не зависит от температуры и одинаков по всей толщине стенки. Значение λ находят по справочникам, при средней температуре $\bar{t} = 0,5(t_{c1} + t_{c2})$.

Погрешность расчетов при этом обычно меньше погрешности исходных данных и табличных величин. При линейной зависимости, $\lambda = a + bt$, точная расчетная формула для q не отличается от приближенной.

Количество теплоты, передаваемой через произвольную поверхность F ,

$$Q = qF = (t_{c1} - t_{c2})\lambda F / \delta, \text{ Вт} \quad (15)$$

Отношение $\delta / \lambda F$ называется термическим сопротивлением стенки и обозначается R_λ .

Таким образом:

$$Q = (t_{c1} - t_{c2}) / R_\lambda. \quad (16)$$

Очень часто термическим сопротивлением называют величину δ / λ , которая равна термическому сопротивлению плоской стенки площадью 1 м^2 .

Многослойная стенка.

Формулой (16) можно пользоваться и для расчета теплового потока через стенку, состоящую из нескольких плотно прилегающих друг к другу слоев разнородных материалов. Термическое сопротивление такой стенки равно сумме термических сопротивлений отдельных слоев:

$$R_\lambda = \sum_{i=1}^n R_{\lambda i} = \sum_{i=1}^n \delta_i / F \lambda_i. \quad (17)$$

В формулу (16) нужно подставить разность температур в тех точках (поверхностях), между которыми включены все суммирующие термические сопротивления, т.е. в данном случае t_{c1} и $t_{c(n+1)}$:

$$Q = (t_{c1} - t_{c(n+1)}) / \sum_{i=1}^n R_{\lambda i} = (t_{c1} - t_{c(n+1)}) / \sum_{i=1}^n \delta_i / F \lambda_i. \quad (18)$$

Рассчитав тепловой поток через многослойную стенку, можно определить падение температуры в каждом слое из выражения (18)

$$t_{c(n+1)} = t_{c1} - Q \cdot \sum_{i=1}^n R_{\lambda i}. \quad (19)$$

Цилиндрическая стенка.

Тепловой поток через цилиндрическую стенку:

$$Q = (t_{c1} - t_{c2}) / \left(\frac{1}{2\pi\lambda l} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1} \right) = (t_{c1} - t_{c2}) / R_\lambda, \quad (20)$$

где l – длина цилиндра, м;

d_2 и d_1 – наружный и внутренний диаметры цилиндра, соответственно, м.

R_λ – термическое сопротивление для цилиндрической стенки,

$$R_\lambda = \frac{1}{2\pi\lambda l} \ln \frac{d_2}{d_1}, \text{ К/Вт.}$$

Для определения теплового потока через многослойную цилиндрическую стенку следует, как и для многослойной плоской стенки, просуммировать термические сопротивления отдельных слоев:

$$Q = (t_{c1} - t_{c(n+1)}) / \sum_{i=1}^n R_{\lambda i} = (t_{c1} - t_{c(n+1)}) / \sum_{i=1}^n \frac{1}{2\pi\lambda_i l} \ln \frac{d_{(i+1)}}{d_i}. \quad (21)$$

Расчет температур на границах слоев в данном случае осуществляется так же, как и для многослойной плоской стенки, т.е. по формуле (19).

Шаровая стенка.

Тепловой поток через шаровую стенку:

$$Q = (t_{c1} - t_{c2}) / \left(\frac{1}{4\pi\lambda} \cdot \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \right) = (t_{c1} - t_{c2}) / R_\lambda, \quad (22)$$

где r_1 и r_2 – внутренний и наружный радиусы шара, м;

R_λ – термическое сопротивление для стенки шара,

$$R_\lambda = \frac{1}{4\pi\lambda} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right), \text{ К/Вт.}$$

Для определения теплового потока через многослойную шаровую стенку следует, как и для многослойной цилиндрической стенки, просуммировать термические сопротивления отдельных слоев:

$$Q = (t_{c1} - t_{c(n+1)}) / \sum_{i=1}^n R_{\lambda i} = (t_{c1} - t_{c(n+1)}) / \sum_{i=1}^n \frac{1}{4\pi\lambda_i} \left(\frac{1}{r_i} - \frac{1}{r_{(i+1)}} \right). \quad (23)$$

Расчет температур на границе слоев в данном случае осуществляется также, как и для многослойной плоской стенки, т.е. по формуле (19)

В более сложном процессе переноса теплоты теплопроводностью и конвекцией расчет теплового потока производится по формулам (15) и (18) для соответственно однослойной и многослойной плоской стенки, (20) и (22) – для однослойной и многослойной цилиндрической стенки и (22) и (23) – для однослойной и многослойной стенки шара.

В указанных формулах вместо температур t_{c1} и t_{c2} ($t_{c(n+1)}$) следует подставлять температуры нагретого $t_{ж1}$ и холодного $t_{ж2}$ теплоносителей, омывающих поверхности стенок.

В сумму общего термического сопротивления следует добавить два дополнительных сопротивления, определяемых теплоотдачей от нагретого теплоносителя к стенке $R_{\alpha 1} = 1/F \cdot \alpha_1$ и от другой стенки к холодному теплоносителю $R_{\alpha 2} = 1/F \cdot \alpha_2$. Коэффициент теплоотдачи α , Вт/(м²·К), характеризует интенсивность процесса переноса тепла от жидкого или газообразного теплоносителя к стенке (или от стенки). Коэффициент теплоотдачи обычно определяют экспериментально и его средние значения для большинства практических случаев можно найти в справочной литературе.

В качестве примера формула для расчета теплового потока, передаваемого через плоскую однослойную стенку теплопроводностью и конвекцией, запишется так:

$$Q = (t_{ж1} - t_{ж2}) / (R_{\alpha 1} + R_{\lambda} + R_{\alpha 2}) \quad (24)$$

Варианты заданий 3

3.1 Определить температуры на поверхностях соприкосновения слоев сложной стенки аппарата, составляют из листовой нержавеющей стали толщиной 8 мм, слоя стекловаты толщиной 60 мм, деревянной обшивки толщиной 20 мм и слоя масляной краски в 1 мм. Температура внутренней поверхности стальной стенки аппарата 180 °С. Общий тепловой поток через стенку равен 695,5 Вт. Поверхность аппарата 18,5 м². Коэффициенты теплопроводности принять: для нержавеющей стали 15,12 Вт/(м·К); для масляной краски 0,29 Вт/(м·К); для стекловаты 0,037 Вт/(м·К) и для соснового дерева (перпендикулярно волокнам) 0,107 Вт/(м·К)

3.2 Для постройки временного жилища у арктической экспедиции имеются в распоряжении: фанера сосновая толщиной 5 мм с коэффициентом теплопроводности 0,107 Вт/(м·К); влажная земля (коэффициент теплопроводности 0,7 Вт/(м·К)) и снег (коэффициент теплопроводности 0,465 Вт/(м·К)). В какой последовательности следует расположить материалы в конструкции стенки и какие толщины принять для слоя земли и снега, если плотность теплового потока из жилища не должен превышать 58 Вт/м² при температуре внутри 20 °С и снаружи – 45 °С. Так как получение земли в арктических условиях затруднительно, то слой земли должен быть минимальным.

3.3 Проходящий через цех стальной паропровод диаметром 57 мм, стенка 4 мм необходимо изолировать так, чтобы потери тепла были не более 70 Вт на 1 м паропровода, а температура наружной поверхности изоляции по требованиям техники безопасности не превышала 60 °С. По трубопроводу транспортируется насыщенный пар при давлении 1,18 МПа. В качестве изоляционного материала имеется асбестовый пухшнур (коэффициент теплопроводности 0,175 Вт/(м·К)) и шлаковата (коэффициент теплопроводности 0,07 Вт/(м·К)). Коэффициент теплопроводности стали 49,6 Вт/(м·К). Какова должна быть толщина изоляционного слоя из пухшнура или из шлаковаты?

3.4 Самовар с кипящей водой равномерно теряет тепло в окружающий воздух. Коэффициент теплоотдачи от кипящей воды к стенке равен 4200 Вт/(м² К), а от стенки к воздуху 25,6 Вт/(м² К). Как изменятся теплопотери, если стенка самовара будет изготовлена не из красной меди (толщина 1,5 мм, коэффициент теплопроводности 386 Вт/(м·К)), а из нержавеющей стали (толщина 0,8 мм, коэффициент теплопроводности 19,4 Вт/(м·К))? От чего больше зависит в данном случае размер потерь – от толщины и теплопроводности стенки, теплоотдачи внутри и теплоотдачи снаружи стенки? Для приближенного расчета стенку можно считать плоской.

3.5 В теплообменном аппарате происходит теплопередача через плоскую стальную стенку 3 мм (коэффициент теплопроводности 45,4 Вт/(м·К)). Производительность аппарата оказалась недостаточной. В результате испытания аппарата установлено, что коэффициент теплоотдачи с одной стороны стенки $\alpha_1=1070$ Вт/(м²·К) и с другой $\alpha_2=78$ Вт/(м²·К), а перепад температур через стенку составляет 54 °С. Для интенсификации процесса теплопередачи имеется возможность: а) увеличить α_1 на 60%; б) увеличить α_2 на 20%; в) уменьшить термическое сопротивление стенки, заменив стальную стенку, толщиной 3 мм стенкой из красной меди толщиной 4 мм; г) увеличить температурный перепад на 15%? Какие из этих мероприятий являются эффективными и какие рекомендовать не следует?

3.6 Определить часовую потерю тепла паропроводом длиной 50 м, внутренним диаметром 100 мм и наружным диаметром 108 мм. По паропроводу протекает насыщенный пар под давлением 3 МПа. Паропровод покрыт слоем изоляции «Совелит», толщиной 80 мм. Температура окружающего воздуха 35 °С. Коэффициент теплопроводности стали 52 Вт/(м·К), изоляции – 0,058 Вт/(м·К). Коэффициент теплоотдачи от пара к стенке 465 Вт/(м²·К), и от поверхности изоляции к воздуху 5,8 Вт/(м²·К). Определить также температуру поверхности изоляции.

3.7 Электропровод с сопротивлением 10 Ом/м заключен в цилиндрическую цементную трубу, коэффициент теплопроводности которой является логарифмической функцией от температуры $\lambda=0,159 \ln t$ Вт/(м·К). Внешний и внутренний радиусы трубы соответственно равны 10 мм и 5 мм. По проводу течет электрический ток в 9 А, создавая на внутренней поверхности изоляции постоянную температуру в 150 °С. Определить: 1) температуру на внешней поверхности изоляционной трубы; 2) количество тепла, рассеиваемого с 1 м трубы; 3) средний коэффициент теплопроводности в вычисленном интервале температур.

3.8 Кипятильная труба котла со стороны воды покрыта накипью толщиной 5 мм. Каким слоем сажи должна покрыться труба со стороны газов, чтобы при отсутствии накипи со стороны воды количество тепла, передаваемого трубой, оставалось бы без изменения? Какова в этих случаях температура наружной и внутренней поверхности трубы? Принять коэффициенты теплопроводности стали 40,7 Вт/(м·К), накипи 2,32 Вт/(м·К), сажи 0,349 Вт/(м·К). Коэффициенты теплоотдачи со стороны газов 46,5 Вт/(м²·К), со стороны воды 2325 Вт/(м²·К). Стенку трубы считать плоской, толщиной 25 мм. Температура газов 800 °С, температура воды 150 °С.

3.9 Барабан обогревается изнутри сухим насыщенным паром, а снаружи окружен воздухом. Внутренний диаметр его равен 600 мм, длина 2500 мм и толщина стенки 10 мм. Как велика будет ошибка в определении количества тепла, передаваемого цилиндрической поверхностью барабана за 1 ч, если считать его стенку плоской? При подсчете принять: давление обогревающего пара 0,5 МПа; материал барабана – медь (коэффициент теплопроводности 372 Вт/(м·К)); коэффициенты теплоотдачи от пара к стенке 11630 Вт/(м²·К), от стенки к воздуху 11,63 Вт/(м²·К); температуру воздуха, окружающего барабан 20 °С.

3.10 Торец стального стержня квадратного сечения 40*40 мм, длиной 2 м имеет температуру 300 °С. Найти: 1) Количество тепла, передаваемого стержнем за 1 ч.; 2) температуры стержня на расстоянии 0,5; 1 и 2 м от нагреваемого торца, если температура окружающего воздуха 25 °С. Коэффициент теплоотдачи боковой торцевой поверхностями стержня принять 9 Вт/(м²·К), коэффициент теплопроводности материала стержня 46 Вт/(м·К). Теплоотдачей торца не пренебрегать.

3.11 Выяснить влияние воздушной прослойки в обмуровке парового котла на потерю тепла в окружающую среду и на температуру наружной поверхности обмуровки, если:

!) коэффициенты теплоотдачи дымовыми газами с температурой 1100 °С к стене и стеной к наружному воздуху с температурой 300 °С соответственно равны 11,6 и 5,8 Вт/(м²·К).

2) коэффициенты теплопроводности огнеупорного кирпича 1,92 Вт/(м·К), красного кирпича 0,82 Вт/(м·К), воздуха в прослойке 0,0465 Вт/(м·К).

3.12 Стальная труба внутренним диаметром 100 мм с толщиной стенки 5 мм покрыта слоем асфальтовой изоляции. Найти критическую толщину слоя изоляции и соответственно максимальную отдачу тепла с 3м трубы, если по трубе протекает вода с температурой 20 °С, а снаружи обдувается воздухом с температурой 15 °С. Коэффициент теплопроводности стали 46,5 Вт/(м·К), а от поверхности изоляции к воздуху 10,5 Вт/(м²·К).

3.13 Плоская стенка бака площадью 5 м² покрыта двухслойной изоляцией. Стенка бака стальная, толщиной 8 мм, коэффициент теплопроводности 46,5 Вт/(м·К). Первый слой изоляции выполнен из асбозурита толщиной 50 мм с коэффициентом теплопроводности 0,144 Вт/(м·К), второй – штукатурка толщиной 10 мм, коэффициент теплопроводности которой равен 0,698 Вт/(м·К). Температуры внутренней поверхности стенки бака 250 °С, и внешней поверхности изоляции 50 °С. Вычислить количество теплоты, теряемой баком, и построить график распределения температуры по сечению стенки с изоляцией.

3.14 Обмуровка печи состоит из слоев шамотного и красного кирпича, между которыми расположена засыпка из диатомита. Толщина шамотного слоя $\delta_1=120$ мм, диатомитовой засыпки $\delta_2=50$ мм, и красного кирпича $\delta_3=250$ мм. Коэффициенты теплопроводности материалов соответственно равны: шамотный кирпич – $0,93$ Вт/(м·К), диатомитная засыпка $0,13$ Вт/(м·К) и красный кирпич – $0,7$ Вт/(м·К). Какой толщины следует сделать слой из красного кирпича, если отказаться от применения засыпки из диатомита, чтобы тепловой поток через обмуровку остался неизменным?

3.15 Стены сушильной камеры выполнены из слоя красного кирпича толщиной 250 мм и слоя строительного войлока. Температура на внешней поверхности кирпичного слоя 110 °С и на внешней поверхности войлочного слоя 25 °С. Коэффициенты теплопроводности красного кирпича и строительного войлока соответственно равны $0,7$ и $0,0465$ Вт/(м·К). Вычислить температуру в плоскости соприкосновения слоев и толщину войлочного слоя при условии, что тепловые потери через 1 м² стенки камеры не превышают 110 Вт/м².

3.16 Железобетонная дымовая труба внутренним диаметром 800 мм и наружным диаметром 1300 мм должна быть футерована изнутри огнеупором. Определить толщину футеровки и температуру поверхности трубы из условий, чтобы тепловые потери с 1 м трубы не превышали 2000 Вт/м², а температура внутренней поверхности железобетонной стенки не превышала 200 °С. Температура внутренней поверхности футеровки 425 °С; коэффициент теплопроводности футеровки $0,5$ Вт/(м·К), коэффициент теплопроводности бетона $1,1$ Вт/(м·К).

3.17 Электрический нагреватель выполнен из нихромовой проволоки диаметром 2 мм и длиной 10 м. Он обдувается холодным воздухом с температурой 20 °С. Вычислить тепловой поток с 1 м нагревателя, составляет 25 А. Удельное электрическое сопротивление нихрома $1,1$ Ом·мм²/м; коэффициент его теплопроводности $17,5$ Вт/(м·К) и коэффициент теплоотдачи от поверхности нагревателя к воздуху $46,5$ Вт/(м²·К).

3.18 Необходимо изолировать корпус теплообменного аппарата, имеющего внешний диаметр 300 мм и температуру на поверхности 280 °С, которую можно принять такой же и после наложения изоляции. Температура на внешней поверхности изоляции не должна превышать 30 °С, а тепловые потери с 1 м корпуса теплообменника – 200 Вт/м². Коэффициент теплоотдачи от внешней поверхности изоляции к окружающему воздуху 8 Вт/(м²·К). Целесообразно ли выбрать в качестве тепловой изоляции шлаковату, коэффициент теплопроводности которой $0,06$ Вт/(м·К). Если целесообразно, то какой толщины должен быть слой этой изоляции при заданных условиях?

3.19 По нихромовому стержню диаметром 5 мм и длиной 420 мм проходит электрический ток под напряжением 10 В. На поверхности стержня кипит вода под давлением 0,5 МПа. Удельное электрическое сопротивление нихрома $1,17 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$, коэффициент теплопроводности $17,5 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$. Определить плотность теплового потока на поверхности стержня, тепловой поток на единицу длины стержня и температуры на поверхности и оси стержня к кипящей воде равен $44400 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$.

3.20 Подсчитать количество трансформаторного масла, которое нужно охладить в теплообменнике от температуры $60 \text{ }^\circ\text{C}$ до температуры $30 \text{ }^\circ\text{C}$. Теплообменник выполнен из гладких стальных труб внутренним диаметром 16 мм, толщиной стенки 1 мм с коэффициентом теплопроводности $50 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$. Общая поверхность теплообменника 40 м^2 . В первом варианте трубы чистые, а во втором загрязнены с обеих сторон отложениями толщиной 0,1 мм с коэффициентом теплопроводности $0,2 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$. Температура охлаждающего воздуха $0 \text{ }^\circ\text{C}$, коэффициенты теплоотдачи от труб к воздуху и от масла к стенке трубы 40 и $2000 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ соответственно. Теплоемкость трансформаторного масла $1,788 \text{ КДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$. Вычислить также температуру наружной поверхности трубы.

3.21 Длительно допустимая нагрузка для стальных шин прямоугольного сечения $100\times 3 \text{ мм}$, установленных на ребро, не должна превышать 300 А. Максимальная температура шины при температуре окружающего воздуха $25 \text{ }^\circ\text{C}$ должна быть не выше $70 \text{ }^\circ\text{C}$. Вычислить температуру на поверхности шины и определить, каким должен быть коэффициент теплоотдачи с ее поверхности, чтобы температура шины не превышала максимально допустимого значения в $70 \text{ }^\circ\text{C}$. Коэффициент теплопроводности стали $64 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, удельное электрическое сопротивление стали $0,13 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$.

3.22 Каковы будут теплотери человека через одежду, состоящую из четырех слоев одежды толщиной 0,2; 0,5; 2,0 и 6,0 мм с соответствующими коэффициентами теплопроводности 0,15; 0,2; 0,1; и $0,06 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ в зимнее время. Площадь кожного покрова человека 2 м^2 . Температура кожного покрова человека $35 \text{ }^\circ\text{C}$, температура окружающего воздуха $-20 \text{ }^\circ\text{C}$, коэффициент теплоотдачи от одежды к воздуху $5 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$.

3.23 Трубка из нержавеющей стали внутренним диаметром 7,6 мм и наружным диаметром 8 мм нагревается электрическим током путем непосредственного включения в электрическую цепь. Вся теплота, выделяемая в стенке трубки, отводится через внутреннюю поверхность трубки. Вычислить объемную производительность этого источника теплоты и перепад температур в стенке трубки, если по трубке пропускается ток 250 А. Удельное электрическое сопротивление и коэффициент теплопроводности стали равны соответственно $0,85 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$ и $18 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$.

3.24 Витрина магазина размером $2,5 \times 3,0$ м выполнена из двух слоев стекла толщиной 6 мм с воздушной прослойкой между ними 150 мм. Температура наружного воздуха -35°C , в помещении 20°C . Коэффициенты теплоотдачи от воздуха к внутренней стенке стекла $4 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, а от наружной стенки к воздуху $6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Теплопроводность стекла $0,74 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, а воздуха в воздушной прослойке $0,025 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$. Определить потери тепла через витрину и распределение падения температуры в поперечном сечении.

3.25 Вычислить силу тока, проходящему по медному проводу диаметром 5 мм, когда температура провода составляет 120°C . Определить также возможность использования резины в качестве наружного слоя изоляции, если изоляция состоит из четырех слоев с толщинами 1,0; 0,08; 0,15 и 0,12 $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$. Предельная температура резины 60°C , температура окружающего воздуха 20°C , коэффициент теплоотдачи от поверхности изоляции к окружающему воздуху $5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

2.26 В камере сгорания парового котла температура газов равна 1300°C , температура воздуха в котельной 30°C . Стены топочной камеры выполнены из слоя огнеупора толщиной 250 мм с коэффициентом теплопроводности $0,28 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ и слоя диатомитового кирпича с коэффициентом теплопроводности $0,113 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$. Коэффициент теплоотдачи от газов к обмуровке $30 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, а от внешней поверхности топочной камеры к окружающему воздуху $10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Какой должна быть толщина диатомитового слоя, чтобы потери в окружающую среду не превышали $750 \text{ Вт}/\text{м}^2$?

3.27 Теплопровод с внутренним диаметром 150 мм и внешним диаметром 165 мм, проложен на открытом воздухе с температурой -15°C . Температура воды в трубе 90°C , коэффициент теплоотдачи от воды к стенке трубы $1000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, и от трубы к окружающему воздуху $12 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Коэффициент теплопроводности стали $50 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$. Насколько изменятся потери теплоты с 1 погонного метра трубы и профиль температур, если теплопровод покрыть слоем изоляции толщиной 60 мм с коэффициентом теплопроводности $0,15 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$. Коэффициент теплоотдачи от поверхности изоляции к окружающему воздуху $8 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

3.28 Стена жилого дома сложена из кирпича толщиной 640 мм. Коэффициент теплопроводности кирпича $0,8 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, коэффициент теплоотдачи от воздуха в помещении к стенке $10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Температура в помещении 20°C , а окружающей среды -35°C . Насколько изменятся теплотери с 1 м^2 стены и профиль температур, если стену с наружной стороны покрыть слоем пенопласта толщиной 50 мм с коэффициентом теплопроводности $0,04 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$

3.29 Вычислить профиль температур и количество тепла, выделяемого с наружной поверхности тепловыделяющего элемента ядерного реактора. Тепловыделяющий элемент выполнен в виде шара, в центре которого помещено ядерное горючее, закрытое слоем графита и твердой оболочкой. Диаметры ядра и слоев равны 0,01; 0,055 и 0,06 м с соответствующими коэффициентами теплопроводности 122 и 20 Вт/(м·К). Температура горючего 1500 °С, температура охлаждающего шар гелия 300 °С. Коэффициент теплоотдачи от стенки шара к гелию 50 Вт/(м²·К).

3.30 Определить расход жидкого кислорода, необходимого для подпитки бака с окислителем ракеты, установленный на стартовом устройстве. Бак ракеты, изготовленный из алюминиевого сплава (коэффициент теплопроводности 116,3 Вт/(м·К)) имеет форму цилиндра диаметром 1,6 м и высотой 3 м. Толщина стенки бака 3 мм. Между боковой стенкой бака и корпусом ракеты проложен слой стекловаты толщиной 5 мм (коэффициент теплопроводности 0,037 Вт/(м·К)). Корпус ракеты изготовлен из материала толщиной 2 мм с коэффициентом теплопроводности 15,1 Вт/(м·К). Температура на поверхности корпуса ракеты 20 °С, температура кипения кислорода -183 °С, а теплота парообразования 211 кДж/кг. Теплоотдачей с торцов бака пренебречь.

4. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАДАНИЯ 4 КОНВЕКЦИЯ И ИЗЛУЧЕНИЕ. ТЕПЛООБМЕННЫЕ АППАРАТЫ.

Процесс теплообмена между поверхностью твердого тела и жидкостью (газами) называется *теплоотдачей*. Согласно закону Ньютона – Рихмана тепловой поток в процессе теплоотдачи определяется по формуле:

$$Q = \alpha F |t_c - t_{ж}| \quad (25)$$

В процессе теплоотдачи, независимо от направления от направления теплового потока Q (от стенки с температурой t_c к жидкости C температурой $t_{ж}$ или наоборот), значения его принято считать положительным, поэтому разность $|t_c - t_{ж}|$ берут по абсолютной величине. В формуле (4.1) F – площадь теплообмена, m^2 , α – коэффициент теплоотдачи, $Вт(m^2 \cdot K)$.

Одной из основных задач конвективного теплообмена является определение α для конкретных условий теплообмена. Аналитическое определение α , как правило, невозможно потому, что величина его зависит от многих переменных: параметров процесса физических констант, геометрических размеров и граничных условий. Поэтому, коэффициент теплоотдачи α определяется по эмпирическим формулам, которые составлены в критериальной форме по правилам теории подобия.

Для *стационарных условий* конвективного теплообмена теория подобия дает следующую критериальную зависимость:

$$Nu = f(Re, Pr, Gr), \quad (26)$$

где

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda} \text{ - критерий Нуссельта;}$$

$$Re = \frac{w \cdot l}{\nu} \text{ - критерий Рейнольдса;}$$

$$Pr = \nu / a \text{ - критерий Прандтля;}$$

$$Gr = \frac{l^3}{\nu^2} \beta (t_c - t_{ж}) \text{ - критерий Грасгофа;}$$

L – определяющий размер, м ;

λ – коэффициент теплопроводности жидкости (газа), $Вт(m \cdot K)$;

w – скорость потока, контактирующего с твердой поверхностью, м/с;

ν – коэффициент кинематической вязкости жидкости (газа), m^2/c ;

β – коэффициент объемного расширения, $1/K$. для газов $\beta = 1/T_r$ (T_r – средняя температура газа, участвующего в теплообмене, К)

a – коэффициент температуропроводности жидкости (газа), m^2/c ;

$a = \lambda / c_p \rho$, где в свою очередь, c_p – теплоемкость жидкости (газа),

$кДж/(кгK)$, ρ – плотность жидкости (газа), $кг/m^3$.

Продольное обтекание пластины

Если на всей длине пластины режим течения в пограничном слое ламинарный ($Re_{ж} < 5 \cdot 10^5$), то среднее по поверхности число:

$$Nu = 0,66 Re_{ж}^{0,5} \cdot Pr_{ж}^{0,33} (Pr_{ж} / Pr_c)^{0,25} \quad (27)$$

Если же $Re_{ж} \geq 5 \cdot 10^5$, то режим течения жидкости турбулентный,

$$Nu = 0,037 Re_{ж}^{0,8} \cdot Pr_{ж}^{0,43} (Pr_{ж} / Pr_c)^{0,25} \quad (28)$$

Расшифровка всех безразмерных чисел, входящих в уравнения (27) и (28) приведена в уравнении (26). Индекс «ж», имеющийся у большинства безразмерных чисел, обозначает, что за определяющую принята температура набегающего потока, а Pr_c выбирается при температуре стенки t_c . Отношение $(Pr_{ж} / Pr_c)^{0,25}$ в целом (оно будет встречаться и в других формулах) учитывает изменение свойств теплоносителя по толщине пограничного слоя (за толщину гидродинамического пограничного слоя принимают расстояние от поверхности теплообмена, на котором скорость потока становится равной $0,99 w_{ж}$). Величина этой поправки существенно отличается от единицы только для капельных жидкостей. Для газов с достаточной точностью можно считать, что $(Pr_{ж} / Pr_c)^{0,25} \approx 1,0$. Коэффициенты λ , ν , c_p , ρ , α , Pr берутся по таблицам 2; 3; 4 и 5 приложения в зависимости от средней температуры потока жидкости или газа.

Поперечное обтекание одиночной трубы и пучка труб.

При поперечном обтекании одиночной круглой трубы спокойным нетурбулизированным потоком теплоотдачи определяется формулой:

$$Nu_{ж} = (0,43 + c Re_{ж}^n \cdot Pr_{ж}^{0,38}) \epsilon_{\varphi} \quad (29)$$

Параметры теплоносителя в формуле (29) соответствует условиям набегающего потока, а определяющим размером является наружный диаметр трубы.

Значение коэффициента c и показателя степени n в зависимости от критерия Re следующие:

$Re =$	$(1 \cdot 10^3 - 4 \cdot 10^3)$	$(4 \cdot 10^3 - 4 \cdot 10^4)$	$(4 \cdot 10^4 - 4 \cdot 10^5)$
$c =$	0,55;	0,20;	0,027
$n =$	0,5;	0,62;	0,8.

Коэффициент ε_φ учитывает угол между направлением течения потока и осью трубы. Наибольшие значения α ($\varepsilon_\varphi=1$) наблюдаются при расположении труб перпендикулярно потоку ($\varphi=90^\circ$). Если труба наклонена, то значение $\varepsilon_\varphi=f(\varphi)$, и приближенно:

$\varphi=$	$90^\circ;$	$60^\circ;$	$45^\circ;$	$30^\circ;$	$10^\circ.$
$\varepsilon_\varphi=$	$1,0;$	$0,92;$	$0,8;$	$0,65;$	$0,4.$

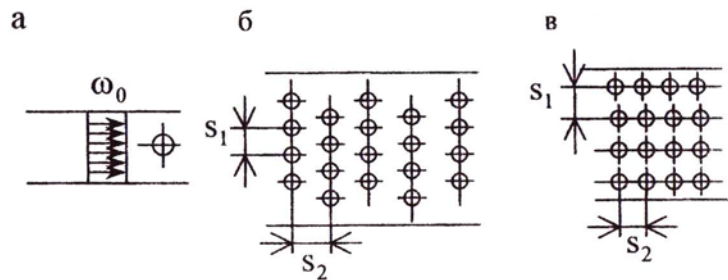


Рисунок 4.1 Расположение труб при поперечном обтекании:
а – одиночная труба; б – шахматный пучок;
в – коридорный пучок.

Во многих теплообменниках трубы располагаются в виде шахматных (Рисунок 4.1, а) или коридорных пучков (Рисунок 4.1,б). В интервале $Re_{ж}=10^3 \dots 10^5$ теплоотдача в таких случаях определяется формулой:

$$Nu=CRe_{ж}^n \cdot Pr_{ж}^{0,33} (Pr_{ж}/Pr_c)^{0,25} \quad (30)$$

Для шахматных пучков $C=0,41$; $n=0,6$; для коридорных пучков $C=0,26$; $n=0,65$.

Определяющим размером в формуле (30) является наружный диаметр труб, определяющей температурой $\bar{t}_{ж}$ - среднее значение между температурами жидкости до пучка и после него. Скорость $w_{ж}$ рассчитывается, как отношение объемного расхода теплоносителя при $\bar{t}_{ж}$ к наиболее узкому сечению в пучке, ширина которого меньше ширины полного сечения канала на величину произведения наружного диаметра труб на их число в одном ряду.

Течение теплоносителя внутри трубы.

Для наиболее распространенного турбулентного течения $Re=10^4 \dots 5 \cdot 10^6$ теплоотдача определяется формулой:

$$Nu_{ж}=0,021 Re_{ж}^{0,8} \cdot Pr_{ж}^{0,43} (Pr_{ж}/Pr_c)^{0,25} \quad (31)$$

Определяющим размером является внутренний диаметр трубы, а определяющей температурой $\bar{t}_{жс}$ - средняя между температурами теплоносителя на входе и выходе из трубы.

Если труба не круглая, а канал произвольного сечения, то определяющим размером будет эквивалентный диаметр канала $d_{эКВ} = 4F/\Pi$, где F – площадь поперечного сечения канала; Π – внутренний периметр этого сечения.

Теплоотдача при естественной конвекции.

В условиях естественной конвекции в большом объеме теплоносителя используется следующая формула:

$$Nu_{ж} = B (Gr Pr)^n \quad (32)$$

Значение коэффициентов B и показателя степени n зависит от произведения $(Gr Pr)$:

$(Gr Pr) =$	$10^{-3} \dots 10^2;$	$5 \cdot 10^2 \dots 2 \cdot 10^7;$	$> 2 \cdot 10^7;$
B	$=$	$1,18;$	$0,54; 0,135;$
n	$=$	$1/8;$	$1/4; 1/3.$

Все параметры теплоносителя, входящие в критерии подобия, следует брать по таблицам (см. таблицы 2-5 приложения) для данного теплоносителя (воздух, вода, масло и т.д.) при средней температуре между температурами поверхности и теплоносителя вдали от нее, $\bar{t} = 0,5(t_c + t_{жс})$.

Определяющим размером, входящим в критерии Nu и Gr , является диаметр d для горизонтальных труб, а для вертикальных труб и пластин – их высота H .

Теплоотдача при конденсации.

Пар конденсируется, т.е. переходит в жидкое состояние, на поверхности теплообмена, температура которой ниже температуры насыщения ($t_c < t_H$).

Среднее значение коэффициента теплоотдачи от поверхности высотой H :

$$\alpha = 0,9434 \sqrt{\frac{r \rho^2 g \lambda^3}{\mu(t_H - t_c) H}}, \quad (33)$$

и от поверхности горизонтальной трубы диаметром d :

$$\alpha = 0,728 \cdot \sqrt[4]{\frac{\lambda^3 \rho^2 g r}{\mu(t_n - t_c)d}}. \quad (34)$$

Теплофизические параметры конденсата (плотности ρ , кг/м³; коэффициента теплопроводности λ , Вт/(м·К); коэффициента динамической вязкости μ , Па·с) и скрытой теплоты парообразования r , кДж/кг следует определять при температуре насыщения t_n (см таблицу 2 приложения).

Лучистый теплообмен.

Лучистым теплообменом называется процесс переноса тепла электромагнитными волнами.

Если два тела с температурой T_1 и T_2 обмениваются лучистой энергией, разделены прозрачной средой, то тепло, переданное излучением, определяется по формуле:

$$Q_{1-2} = 5,67 \cdot \varepsilon_{np} \cdot F \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \text{ Вт}, \quad (35)$$

где

F - поверхность, м²;

ε_{np} - приведенная степень черноты.

Если эти тела не образуют замкнутую систему, то $\varepsilon_{np} = \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2$; в том случае, когда одно тело окружено другим и не излучает само на себя.

$$\varepsilon_{np} = \frac{1}{1/\varepsilon_1 + \frac{F_1}{F_2}(1/\varepsilon_2 - 1)}, \text{ и когда } F_2 \gg F_1, \varepsilon_{np} = \varepsilon_1.$$

Коэффициент теплоотдачи излучением равен:

$$\alpha_{л} = Q_{1-2} / (T_1 - T_2) \cdot F \quad (36)$$

Теплообменные аппараты.

Задачей конструкторского (проектного) расчета теплообменного аппарата является определение величины поверхности нагрева, необходимой для передачи заданного количества тепла. При поверочном расчете по известным размерам поверхности нагрева определяют количество передаваемого тепла и изменение температуры теплоносителей.

В обоих случаях используют уравнение теплового баланса (уравнение сохранения энергии).

$$Q = m_1 \Delta h_1 = m_2 \Delta h_2,$$

или при постоянных теплоемкостях теплоносителей и изменение агрегатного состояния:

$$Q = m_1 c_{p1} (t_1' - t_1'') = m_2 c_{p2} (t_2'' - t_2'), \quad (37)$$

где

m – расход теплоносителя, кг/с;

Δh – изменение энтальпии теплоносителя, Дж/кг;

c_p – теплоемкость теплоносителя, Дж/(кгК);

t – температура теплоносителя, °С.

Индексом 1 обозначены величины, относящиеся к горячему теплоносителю, индексом 2 – к холодному. Верхний индекс (') означает температуру теплоносителя на входе в аппарат, индекс (") – температуру на выходе. Количество передаваемого тепла в рекуперативном теплообменнике определяется уравнением теплопередачи:

$$Q = \kappa F \Delta \bar{t}, \quad (38)$$

где

F – поверхность теплообмена, м²;

$\Delta \bar{t}$ – средний температурный напор,

$$\Delta \bar{t} = (\Delta t_{\delta} - \Delta t_{\mu}) / \ln \Delta t_{\delta} / \Delta t_{\mu}, \quad (39)$$

где, в свою очередь, Δt_{δ} и Δt_{μ} – наибольшая и наименьшая разность температур теплоносителей на концах теплообменника.

Движение теплоносителей в теплообменнике может быть различным, но все сводится к схеме движения противотока (теплоносители движутся навстречу друг другу) и прямотока (теплоносители движутся в одну сторону). Для исключения ошибок при расчете Δt на концах теплообменника целесообразно рисовать график изменения температур по длине теплообменника;

k – коэффициент теплопередачи, Вт/(м²К),

$$k = \frac{1}{R\alpha_1 + R\lambda + R\alpha_2}, \quad (40)$$

где

$R_{\alpha_1} = 1/\alpha_1$ – термическое сопротивление теплоотдачи от горячего теплоносителя к стенке, $(\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$;

R_{α_2} – термическое сопротивление теплоотдачи от стенки к холодному теплоносителю;

R_λ – термическое сопротивление теплопроводности стенки; для однослойной стенки, например, $R_\lambda = \delta/\lambda$, где δ – толщина плоской стенки.

Вычисление коэффициентов теплоотдачи α_1 и α_2 производится методом последовательных приближений. Вначале для расчета значений α_1 и α_2 приходится задаваться температурой стенки из условия $t_{ж1} > t_{c1} > t_{c2} > t_{ж2}$, причем разность соседних температур t_{c1} и t_{c2} тем больше, чем больше термическое сопротивление между ними. Вычислив величину теплового потока, уточняют значения температур поверхностей стенки. Например, $t_{c1} = t_{ж1} - QR_{\alpha_1}$ и $t_{c2} = t_{c1} - QR_\lambda$. Если получилось то значение, которым задались, или близкое к нему, то решение считают правильным. В противном случае задаются другим значением температуры стенки и проделывают решение снова.

Варианты заданий 4

4.1. Вычислить средний коэффициент теплопередачи при течении трансформаторного листа в трубе внутренним диаметром 8 мм и длиной 1 м, если средняя по длине трубы температура масла равна 80°C , средняя температура стенки трубы 20°C и скорость масла $0,6\text{ м/с}$.

4.2. Тонкая пластина длиной 2 м и шириной 1,5 мм обтекается продольным потоком воздуха. Скорость и температура потока соответственно равна 3 м/с и 20°C . Определить среднее течение коэффициента теплоотдачи и количество теплоты; отдаваемой- пластиной воздуху, при условии, что температура поверхности пластины 90°C .

4.3. По трубе внутренним диаметром 6 мм движется вода со скоростью $0,4\text{ м/с}$. Температура стенки трубы 50°C . Какую длину должна иметь труба, чтобы при температуре воды на входе 10°C , ее температура на выходе из трубы была 20°C ?

4.4. Определить коэффициент теплоотдачи от стенки-трубки конденсатора паротурбинной установки к охлажденной воде, если средняя по длине температура стенки 28°C , внутренний диаметр трубки 16 мм, температура воды на входе и выходе из трубы равны соответственно 10 и 18°C и средняя скорость воды 2 м/с . Определить также количество передаваемой теплоты и длину трубы.

4.5. В вертикальной трубе квадратного течения движется снизу вверх воздух.

Определить: 1) режим движения- ламинарный или турбулентный;

2) коэффициент теплоотдачи от воздуха к стенам трубы, если средняя скорость воздуха $1,0\text{ м/с}$, температура воздуха на входе 150°C , на выходе 50°C , и средняя температура стенки 40°C .

4.6. Определить коэффициент теплоотдачи и количество сконденсировавшегося насыщенного водного пара при давлении $0,4\text{ МПа}$ и степени сухости $0,7$ на поверхности вертикальной трубы высотой $1,5$ и наружным диаметром 65 мм , температура поверхности трубы 55°C .

4.7. По условиям эксплуатации температура горизонтали нихромового неизолированного провода, у которого диаметр 1 мм , не должна превышать 600°C . Определить максимальную допустимую силу тока, если температура воздуха 30°C , удельное электрическое сопротивление $1,2\text{ Ом мм}^2/\text{м}$, степень черноты $0,95$. Провод охлаждается за счет свободной конвекции и излучения.

4.8. Определить коэффициент теплоотдачи от трубы к воздуху, если температура ее наружной поверхности $80\text{ }^{\circ}\text{C}$, температура воздуха $36\text{ }^{\circ}\text{C}$, скорость воздуха 17 м/с . Наружный диаметр трубы $6,5\text{ мм}$.

4.9. В котельной проложены два горизонтальных паропровода диаметром 50 мм^2 и 150 мм . Оба паропровода имеют одинаковую температуру поверхности $450\text{ }^{\circ}\text{C}$. Температура окружающего воздуха $50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Паропроводы проложены друг от друга на расстоянии, исключающим взаимное тепловое влияние. Найти отношение коэффициентов теплоотдачи и потерь теплоты с 1 м паропроводов. Паропроводы покрыты теплоизоляцией с наружным диаметром первого паропровода 100 мм и второго 350 мм , после чего на их наружных поверхностях установилась температура $70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Температура наружного воздуха при этом осталась насыщенной. Найти отношения коэффициентов теплоотдачи и потерь теплоты с 1 м паропроводов в новых условиях.

4.10. Медный шинопровод круглого сечения диаметром 15 мм поперечным потоком воздуха. Скорость и температура набегающего потока воздуха равны соответственно 1 м/с и $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Вычислить коэффициент теплоотдачи от поверхности шинопровода к воздуху и допустимую силу тока в шинопроводе при условии, что температура на его поверхности не должна превышать $80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Удельное электрическое сопротивление меди $0,0175\text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$.

4.11. Сравнить коэффициенты теплоотдачи от стенок трубы к воздуху:
а) при движении воздуха внутри длиной трубы внутренним диаметром 50 мм ;
б) при внешнем поперечном обтекании одиночной трубы наружным диаметром 50 мм ; сравнение произвести для скоростей воздуха $5, 10, 20$ и 50 м/с . Среднюю температуру воздуха во всех случаях принять равной $50\text{ }^{\circ}\text{C}$.

4.12. Труба с внешним диаметром 25 мм охлаждается потоком трансформаторного масла. Скорость движения воздуха и средняя температура масла равны соответственно 1 м/с и $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Определить, какую температуру поверхности трубы следует поддерживать, чтобы плотность теплового потока составляла $4,5\cdot 10^4\text{ Вт/м}^2$, и каково при этом будет значение коэффициента теплоотдачи?

4.13. Сравнить значение коэффициентов теплоотдачи при поперечном обтекании трубки диаметром 8 мм водой и маслом МС. Сравнение произвести при одинаковых скоростях и средних температурах жидкостей, равных соответственно 2 м/с и $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ при температуре поверхности трубы $90\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Определить также, как изменяется значение коэффициентов теплоотдачи для воды и масла, если при тех же средней температуре жидкость и температурном напоре производится охлаждение жидкости (температура жидкости 70°C и температура поверхности стенки 50°C).

4.14 Вычислить потери теплоты в единицу времени с 1 м^2 поверхности горизонтального теплообменника, корпус которого имеет цилиндрическую форму диаметром 400 мм и охлаждается свободным потоком воздуха. Температура поверхности теплообменника 200°C и температура воздуха в помещении 70°C . Вычислить также снижение тепловых потерь в случае, если корпус теплообменника будет покрыт слоем изоляции толщиной 50 мм . Коэффициент теплопроводности изоляции $0,04\text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$

4.15 На поверхности вертикальной трубы высотой 3 м происходит пленочная конденсация сухого насыщенного водного пара. Давление пара $2,5\cdot 10^5\text{ Па}$. Температура поверхности трубы 123°C . Определить толщину пленки конденсата и значение местного коэффициента теплоотдачи в зависимости от расстояния от верхнего конца трубы. Расчет произвести для расстояний, равных $0,1$; $0,2$; $0,4$; $0,6$; $1,0$; $2,0$; и $3,0\text{ м}$. Построить график изменений толщины пленки конденсата и местного коэффициента теплоотдачи по высоте трубы.

4.16. Какую температуру стенки необходимо обеспечить, чтобы при пленочной конденсации сухого насыщенного водяного пара на поверхности горизонтальной трубы диаметром 16 мм и длиной $2,4\text{ м}$ конденсировалось $6,5\cdot 10^{-3}\text{ кг/с}$ пара. Давление пара $0,5\text{ МПа}$. Определить также значение коэффициента температуры в этих условиях.

4.17. Паропровод наружным диаметром 200 мм расположены в большом помещении с температурой воздуха 30°C . Температура поверхности 400°C . Определить тепловые потери с единицы длины паропровода за счет излучения и конвекции. Степень черноты поверхности паропровода равны $0,8$. Температуру стен помещения можно принять равной температуре воздуха 30°C . Найти также соответствующие тепловые потери при температуре паропровода 200°C .

4.18 Рассчитать полный тепловой поток и суммарный коэффициент теплоотдачи от трубопровода наружным диаметром $0,1\text{ м}$, длиной 10 . температура стенки 85°C , использованного для отопления гаража, температура воздуха в котором 20°C , а стен 15°C .

4.19 На поверхности горизонтальной латунной трубы внутренним диаметром 18мм, стенка 1мм, конденсирует сухой насыщенный пар с давлением $2,4 \cdot 10^5$ Па. Внутри трубки протекает охлаждающая вода. Расход и средняя температура воды равны соответственно 400 кг/ч и 40 °С. Определить количество пара, конденсирующего за 1ч на 1м поверхности трубы, кг/м·ч.

4.20. Рассчитать пароводяной подогреватель для следующих условий: тепловая мощность 6 МВт. Подогреватель трубчатый с горизонтальным расположением труб: внутренний диаметр труб 16мм, стенка 1мм, материал-латунь с коэффициентом теплопроводности 100 Вт/(м·К). Температура входа и выхода воды, текущей по трубам соответственно 60 и 100 °С. Скорость движения воды 1,2 м/с. Давление греющего пара в межтрубном пространстве 0,18 МПа.

4.21. По горизонтальному стальному трубопроводу внутренним диаметром 50 мм, стенка 3,5 мм движется вода со скоростью 0,15 м/с. Средняя температура воды 100 °С. Трубопровод изолирован асбестом, наружный диаметр изоляции 89мм. Коэффициенты теплопроводности для стали 46Вт/(м·К) и для асбеста 0,116Вт/(м·К) Определить также температуру поверхностей трубопровода и изоляции.

4.22. Трубчатый воздухоподогреватель предполагается выполнить из труб наружным диаметром 38 мм, расположенным в коридорном порядке с поперечным и продольными шагами равным 2,5 от наружного диаметра. Число труб в одном ряду поперек потока выбрать 8, число рядов 5. Температура воздуха, поступающего в подогреватель и на выходе из него соответственно равны 80 и 150°С. Какой длины должны быть трубы, чтобы при скорости воздуха в узком сечении пучка труб 10м/с, количество теплоты, передаваемой воздуху, составляло 125кВт.

4.23 Водяной пар под давлением 0,25 МПа поступает в вертикальную секцию водонагревателя и используется для нагрева воды, текущей в трубах от температуры 70 °С до температуры 110 °С. Расход воды 180 т/ч, мощность труб – латунь с коэффициентом теплопроводности 110 Вт/(м·К). Необходимо определить требуемый расход пара и поверхность водонагревателя, если внутренний диаметр трубы 18мм, стенка 1,0 мм.

4.24. Определить площадь поверхности нагрева экономайзера парового котла, нагреваемого 230т/ч воды от температуры 160 °С до температуры 300 °С. Вода движется снизу вверх по стальным трубкам (коэффициент теплопроводности 22Вт/(м·К)) диаметром 44 мм, стенка 3,5 мм со скоростью 0,6 м/с.

Дымовые газы (13% CO_2 и 11% H_2O) движутся сверху вниз в межтрубном пространстве со средней скоростью в узком сечении пучка 13 м/с. Расход газов 500 т/ч температура газов на входе в экономайзер 800 °С. Расположение труб шахматное.

4.25. Выполнить тепловой расчет по определению поверхности теплообмена пароперегревателя парового котла паропроизводительностью 230 т/ч при давлении 9,8 МПа и температуре перегрева 510 °С. В паронагреватель поступает сухой насыщенный водяной пар. Пар движется по стальным трубкам диаметром 28 мм, стенка 2 мм (коэффициент теплопроводности 22 Вт/(м·К)) со средней скоростью 17 м/с.

Дымовые газы (13% CO_2 , 11% H_2O) в количестве 500 т/ч движутся поперек трубного пучка с коридорным расположением труб. Температура газов на входе 1100 °С, средняя скорость газов в узком сечении пучка 14 м/с.

4.26. Определить поверхность нагрева прямоточного и противоточного воздуха подогревателя, смываемого дымовыми газами (13% CO_2 и 11% H_2O). Температура воздуха на входе 30 °С и на выходе 200 °С. Количество подогреваемого воздуха 6000 м³/ч. Температура дымовых газов до воздухоподогревателя и после него соответственно 510 и 320 °С. Скорость воздуха в трубах воздухоподогревателя 25 м/с. Внутренний диаметр труб 50 мм, стенка 3,0 мм, расположение труб коридорное. Скорость дымовых газов в узком сечении пучка труб 15 м/с.

4.27. Плоская стальная стенка парового котла толщиной 25 мм и длиной 5 м омываемый с одной стороны дымовыми газами (13% CO_2 и 11% H_2O) с температурой 1000 °С, а с другой кипящей водой с температурой 190 °С. Стенка покрыта слоем накипи 1,5 мм. Коэффициент теплопроводности стали 40 Вт/(м·К), накипи 1,0 Вт/м·К. Определить удельный тепловой поток и температуру стенки накипи, если скорость натекания газов на стенку 20 м/с, а коэффициент теплоотдачи от стенки к воде 4500 Вт/(м²·К.)

4.28. Определить поверхность нагрева воздушного подогревателя с противотоком при продольном обтекании труб. Стальные трубы внутренним диаметром 18 мм, стенка 1 мм, коэффициент теплопроводности 50 Вт/(м·К). Расстояние между трубами 30*34 мм. Расход движущегося по трубе воздуха 54 кг/с, давление 0,4 МПа, температура на входе 180 °С и на выходе 380 °С. Расход продуктов сгорания (13% CO_2 и 11% H_2O) обтекающих труб 50 кг/с. Начальная температура газов 430 °С их давление 0,11 МПа. Средняя скорость газа 17 м/с, воздуха 22 м/с.

4.29. В секционном теплообменнике также «труба в трубе» горячее трансформаторное масло охлаждается водой. Трансформаторное масло движется по внутренней латунной трубе диаметром 12 мм, стенка 1 мм, коэффициент теплопроводности латуни 120 Вт/(м·К.) со скоростью 4 м/с. Температура масла на входе в теплообменник 100 °С. Вода движется по кольцевому зазору противотоком по отношению к маслу со скоростью 2,5 м/с, ее температура на входе 20 °С. Внутренний диаметр внешней трубы 22 мм. Определить общую длину теплообменной поверхности, при которой температура масла на выходе будет 60 °С.

4.30 Теплообменник «воздух-вода» охлаждает 250 м³/мин сжатого воздуха под давлением 0,9 МПа начальная температура воздуха 135 °С, конечная 35 °С. Охлаждаемая среда – вода, которая с начальной температурой 20 °С движется по латунным трубкам с внутренним диаметром 12 мм, стенка 1 мм, коэффициент теплопроводности латуни 110 Вт/(м·К). Расход воды 40 м³/ч. Поток воздуха движется в межтрубном пространстве шахматного пучка труб с наименьшим расстоянием между соседними трубками 18 мм. Длина труб в теплообменном пучке 2 м. Определить поверхность нагрева воздухоохладителя.

5. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАДАНИЯ 5 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ТЕПЛОВОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ

Экономичность работы электрической станции оценивается коэффициентами полезного действия, удельным расходом условного топлива, удельным расходом тепла на выработку электроэнергии и себестоимостью энергии.

К.п.д. электростанции подразделяются на к.п.д. брутто, определяемый без учета расхода энергии на собственные нужды, и к.п.д. нетто – с учетом расхода электрической энергии и тепла на собственные нужды.

К.п.д. конденсационной электростанции (КЭС) брутто $\eta_{КЭС}^{бр}$ представляет собой отношение количества выработанной электроэнергии, подведенной с топливом,

$$\eta_{КЭС}^{бр} = \mathcal{E}^{выр} / (BQ_n^p), \quad (41)$$

где

$\mathcal{E}^{выр}$ - количество выработанной электроэнергии, кДж;

B – расход топлива, кг;

Q_n^p - низшая теплота сгорания рабочей массы топлива, кДж/кг.

Если известны к.п.д. отдельных узлов и установок электростанции, то без учета работы питательных насосов к.п.д. КЭС брутто может быть определен по формуле:

$$\eta_{КЭС}^{бр} = \eta_{к.у} \eta_{тр} \eta_t \eta_{ol} \eta_m \eta_G,$$

где

$\eta_{к.у}$ - к.п.д. котельной установки;

$\eta_{тр}$ - к.п.д. трубопроводов;

η_t - термический к.п.д. цикл Ренкина при заданных параметрах пара на электростанции;

η_{ol} - относительный внутренний к.п.д. турбины;

η_m - механический к.п.д. турбины;

η_G - электрический к.п.д. генератора.

К.п.д. конденсационной электростанции нетто $\eta_{КЭС}^{нетто}$ представляет собой отношение отпущенной электроэнергии к энергии, подведенной с топливом,

$$\eta_{КЭС}^{нетто} = \mathcal{E}^{отп} / BQ_n^p, \quad (42)$$

где

$\mathcal{E}^{omn} = \mathcal{E}^{6br} - \mathcal{E}^{c.n.}$ - количество отпущенной электроэнергии \mathcal{E}^{omn} , равное разности выработанной \mathcal{E}^{6br} и израсходованной на собственные нужды станции $\mathcal{E}^{c.n.}$, кДж.

Для теплоэлектроцентралей (ТЭЦ) применяются частные к.п.д. выработке электроэнергии $\eta_{KЭС}^{\mathcal{E}}$ и тепла $\eta_{KЭС}^Q$.

К.п.д. ТЭЦ *брутто* по выработке электроэнергии определяется по формуле:

$$\eta_{TЭЦ}^{6br} = \mathcal{E}^{6br} / (B_{\mathcal{E}} Q_n^p), \quad (43)$$

где

$B_{\mathcal{E}}$ - расход топлива на выработку электроэнергии, кг.

К.п.д. ТЭЦ *брутто* по выработке тепла находится по формуле:

$$\eta_{TЭЦ}^{6br} = Q^{omn} / (B_{\mathcal{E}} Q_n^p), \quad (44)$$

где

Q^{omn} - количество тепла, отпускаемого потребителям, кДж;

B_Q - расход топлива на выработку отпущенного тепла, кг.

К.п.д. ТЭЦ *нетто* по отпуску электроэнергии определяется по формуле:

$$\eta_{TЭЦ}^{Энетто} = \mathcal{E}^{omn} / [(B_{\mathcal{E}} - B_{c.n.}) Q_n^p], \quad (45)$$

где

$B_{c.n.}$ -расход топлива на выработку электроэнергии для собственных нужд, потребляемый в связи с отпуском тепла, кг.

К.п.д. ТЭЦ *нетто* по отпуску тепла находятся по формуле

$$\eta_{TЭЦ}^{Энетто} = Q^{omn} / [(B_{\mathcal{E}} + B_{c.n.}) Q_n^p]. \quad (46)$$

Удельный расход условного топлива (кг/ МДж) на КЭС на выработку 1 МДж (10^3 кДж) электроэнергии определяется по формуле

$$b_{KЭС}^y = B Q_n^p / (29,3 \mathcal{E}^{6br}) = 0,0342 / \eta_{KЭС}^{6br}. \quad (47)$$

Удельный расход условного топлива [$кг / (кВт \cdot ч)$] на КЭС на выработку 1 кВт·ч электроэнергии находится по формуле

$$b_{KЭС}^y = 3600 B Q_n^p / (29,3 \mathcal{E}^{6br}) = 0,123 / \eta_{KЭС}^{6br}.$$

Удельный расход условного топлива (кг/МДж) на ТЭЦ на выработку 1 МДж электроэнергии определяется по формуле:

$$b_{ТЭЦ}^y = B_{\mathcal{E}} Q_n^p / (29,3 \mathcal{E}^{6bp}) = 0,0342 / \eta_{КЭС}^{6bp}. \quad (48)$$

Удельный расход условного топлива $[кг / (кВт \cdot ч)]$ ТЭЦ на выработку 1 кВт · ч электроэнергии находится по формуле:

$$b_{\mathcal{E}ТЭЦ}^y = 3600 B_{\mathcal{E}} Q_n^p / (29,3 \mathcal{E}^{6bp}) = 0,123 / \eta_{КЭС}^{6bp}.$$

Удельный расход условного топлива (кг/ МДж) на ТЭЦ на выработку 1 МДж тепла определяется по формуле:

$$b_{QТЭЦ}^y = B_Q Q_n^p / (29,3 Q^{omn}) = 0,0342 / \eta_{КЭС}^{6bp}.$$

Удельный расход тепла $[МДж / (кВт \cdot ч)]$ на выработку электроэнергии на КЭС находится по формуле:

$$d_{КЭС}^{\mathcal{E}} = Q_n^p b_{КЭС}^y, \quad (49)$$

или

$$d_{КЭС}^{\mathcal{E}} = 1 / \eta_{КЭС}^{6bp}.$$

Удельный расход тепла $[МДж / (кВт \cdot ч)]$ на выработку электроэнергии на ТЭЦ определяется по формуле:

$$d_{ТЭЦ}^{\mathcal{E}} = Q_n^p b_{ТЭЦ}^y, \quad (50)$$

или

$$d_{ТЭЦ}^{\mathcal{E}} = 1 / \eta_{ТЭЦ}^{6bp}.$$

Расход топлива (кг) на выработку отпущенного находится по формуле

$$B_{ТЭЦ} = B_{\mathcal{E}} + B_Q. \quad (51)$$

Расход топлива (кг) на ТЭЦ может определено по формуле:

$$B_{ТЭЦ} = D / И,$$

где

И – испарительность топлива ,кг/кг;

D- расход на ТЭЦ, кг.

Коэффициент использования тепла топлива на ТЭЦ оценивает эффективность использования топлива:

$$\eta_{ТЭЦ} = (Q^{omn} + \mathcal{E}^{6bp}) / (B_{ТЭЦ} Q_n^p). \quad (52)$$

Себестоимость 1 кВт·ч электроэнергии $[кон/(кВт \cdot ч)]$ отпускаемой КЭС, определяется по формуле:

$$S_{КЭС}^{omn} = \Sigma I / \mathcal{E}^{omn} = [(I_{мон} + I_{ам} + I_{з-п} + \Sigma I_{пр}) / \mathcal{E}^{omn}] \cdot 100, \quad (53)$$

где

ΣI – сумма затрат, руб/год;

$I_{топ}$ – затраты на топливо, руб/год;

$I_{ам}$ – затраты на амортизацию, руб/год;

$I_{з-п}$ – затраты на заработную плату, руб/год;

$\Sigma I_{пр}$ – все остальные статьи затрат, руб/год.

Себестоимость 1 кВт·ч электроэнергии $[кон/(кВт \cdot ч)]$ отпускаемой ТЭЦ, находится по формуле:

$$S_{ТЭЦ}^{omn} = B_{\mathcal{E}} \Sigma I / (B_{ТЭЦ} \mathcal{E}^{omn}) = [B_{\mathcal{E}} (I_{мон} + I_{з-п} + \Sigma I_{пр}) / B_{ТЭЦ} \mathcal{E}^{omn}] \cdot 100. \quad (54)$$

Вариант заданий 5

5.1 Конденсационная станция израсходовала $B=720 \cdot 10^6$ кг/год каменного угля с низшей теплотой сгорания $Q_n^p = 20500$ кДж/кг и выработала электроэнергию $\mathcal{E}^{вир} = 590 \cdot 10^{10}$ кДж /год, израсходовала при этом на собственные нужды 5% от выработанной электроэнергии. Определить к.п.д. брутто и к.п.д. нетто станции.

5.2 Определить к.п.д. конденсационной электростанции брутто без учета работы питательных насосов, если к.п.д. котельной установки $\eta_{к.у} = 0,89$ к.п.д. трубопроводов $\eta_{тр} = 0,97$, относительный, внутренний к.п.д. турбины $\eta_{ол} = 0,84$, механический к.п.д. турбины $\eta_{м} = 0,98$, электрический к.п.д. генератора $\eta_{г} = 0,69$, начальные параметры пара перед турбинами $p_I = 9$ МПа, $t_I = 550^\circ\text{C}$ и давление пара в конденсаторе $p_{к} = 4 \cdot 10^3$ Па.

5.3 Конденсационная электростанция работает при наличных параметрах пара перед турбинами $p_I = 8,8$ МПа, $t_I = 535^\circ\text{C}$ и давлением пара в конденсаторе $p_{к} = 4 \cdot 10^3$ Па. Определить, на сколько повысится брутто без учета работы питательных насосов с увеличением начальных параметров пара до $p_I = 10$ МПа и $t_I = 560^\circ\text{C}$ если известны к.п.д. котельной установки $\eta_{к.у} = 0,9$, к.п.д. трубопроводов $\eta_{тр} = 0,97$, относительный, внутренний к.п.д. турбины $\eta_{ол} = 0,84$, механический к.п.д. турбины $\eta_{м} = 0,98$ и электрический к.п.д. генератора $\eta_{г} = 0,98$.

5.4 Теплоэлектроцентрль израсходовала $B_{ТЭЦ} = 94 \cdot 10^6$ кг/год каменного угля с низшей теплотой сгорания $Q_n^p = 24700$ кДж/кг, выработав при этом электроэнергию $\mathcal{E}^{вир} = 61 \cdot 10^{10}$ кДж/год и отпустив тепла внешним потребителям $\mathcal{E}^{отп} = 4,4 \cdot 10^{11}$ кДж/год. Определить к.п.д. ТЭЦ брутто по выработке электроэнергии и тепла, если расход топлива на выработку отпущенного тепла составляет $B_Q = 23 \cdot 10^6$ кг/год.

5.5 Теплоэлектроцентрль израсходовала $B_{ТЭЦ} = 72 \cdot 10^6$ кг/год каменного угля с низшей теплотой сгорания $Q_n^p = 25500$ кДж/кг, выработав при этом электроэнергию $\mathcal{E}^{вир} = 48 \cdot 10^{10}$ кДж /год и отпустив тепла внешним потребителям $\mathcal{E}^{отп} = 3,1 \cdot 10^{11}$ кДж /год. Определить к.п.д. ТЭЦ брутто по выработке электроэнергии и тепла, если к.п.д. котельной установки $\eta_{к.у} = 0,88$.

5.6 Теплоэлектроцентраль израсходовала $B_{ТЭЦ} = 82 \cdot 10^6$ кг/год бурого угля с низшей теплотой сгорания $Q_n^p = 15800$ кДж/кг, выработав при этом электроэнергию $\mathcal{E}^{выр} = 38 \cdot 10^{10}$ кДж/год и отпустив тепла внешним потребителям $Q^{омн} = 3,2 \cdot 10^{11}$ кДж/год. Определить к.п.д. ТЭЦ нетто по отпуску электроэнергии и тепла, если расход электроэнергии на собственные нужды 8% от выработанной энергии, расход топлива на выработку отпущенного тепла $B_Q = 20 \cdot 10^6$ кг/год и расход топлива на выработку электроэнергии для собственных нужд $B_{с.н.} = 4,6 \cdot 10^6$ кг/год.

5.7 Теплоэлектроцентраль израсходовала $B_{ТЭЦ} = 96 \cdot 10^6$ кг/год бурого угля с низшей теплотой сгорания $Q_n^p = 15200$ кДж/год, выработав при этом электроэнергию $\mathcal{E}^{выр} = 39 \cdot 10^{10}$ кДж/год и отпустив тепла внешним потребителям $Q^{омн} = 3,6 \cdot 10^{11}$ кДж/год. Определить к.п.д. ТЭЦ нетто по отпуску электроэнергии и тепла, если расход электроэнергии на собственные нужды $\mathcal{E}^{с.н.} = 3,5 \cdot 10^{10}$ кДж/год, к.п.д. котельной установки $\eta_{к.у} = 0,9$ и расход топлива на выработку электроэнергии для собственных нужд $B_{с.н.} = 5 \cdot 10^6$ кг/год.

5.8 Теплоэлектроцентраль израсходовала $B_{ТЭЦ} = 92 \cdot 10^6$ кг/год каменного угля с низшей теплотой сгорания $Q_n^p = 27500$ кДж/кг, выработав при этом электроэнергию $\mathcal{E}^{выр} = 64 \cdot 10^{10}$ кДж/год и отпустив тепла внешним потребителям $Q^{омн} = 4,55 \cdot 10^{11}$ кДж/год.

Определить к.п.д. ТЭЦ брутто и нетто по выработке электроэнергии и тепла, если расход электроэнергии на собственные нужды 6% от выработанной энергии, к.п.д. котельной установки $\eta_{к.у} = 0,87$ и расход топлива на выработку электроэнергии для собственных нужд $B_{с.н.} = 4,5 \cdot 10^6$ кг/год.

5.9 Определить к.п.д. ТЭЦ брутто по выработке электроэнергии и тепла, если удельный расход условного топлива на выработку 1 МДж электроэнергии $b_{\mathcal{E}^{ТЭЦ}}^y = 0,108$ кг/МДж и удельный расход условного топлива на выработку 1 МДж тепла $b_{Q^{ТЭЦ}}^y = 0,042$ кг/МДж.

5.10 Конденсационная станция израсходовала $B = 660 \cdot 10^6$ кг/год каменного угля с низшей теплотой сгорания $Q_n^p = 24700$ кДж/кг и выработала электроэнергию $\mathcal{E}^{выр} = 545 \cdot 10^{10}$ кДж/год. Определить удельный расход условного топлива на выработку 1 МДж электроэнергии.

5.11 Теплоэлектроцентраль израсходовала $B_{ТЭЦ} = 78 \cdot 10^6$ кг/год топлива, выработав при этом электрической энергии $\mathcal{E}^{выр} = 54 \cdot 10^{10}$ кДж/год и отпустив тепла внешним потребителям $Q^{омн} = 3,36 \cdot 10^{11}$ кДж/год.

Определить удельные расходы условного топлива на выработку 1 МДж электроэнергии и 1 МДж тепла, если тепловой эквивалент сжигаемого на ТЭЦ топлива $\mathcal{E}=0,9$ и к.п.д. котельной установки $\eta_{к.у} = 0,89$.

5.12 Определить удельный расход условного топлива на выработку 1 кВт./ч. электроэнергии для конденсационной электростанции с тремя турбогенераторами мощностью $N=50 \cdot 10^3$ кВт каждый и с числом часов использования установленной мощности $T_y = 5000$ ч, если станция израсходовала $V=305 \cdot 10^6$ кг/год каменного угля с низшей теплотой сгорания $Q_n^p = 28300$ кДж/кг.

5.13 Определить удельный расход условного топлива на выработку 1 кВт./ч. электроэнергии для конденсационной электростанции с двумя турбогенераторами мощностью $N=75 \cdot 10^3$ кВт каждый и с коэффициентом использования установленной мощности $k=0,65$, если станция израсходовала $V=576 \cdot 10^6$ кг/год бурого угля с низшей теплотой сгорания $Q_n^p = 15200$ кДж/кг.

5.14 Конденсационная электростанция работает при начальных параметрах пара перед турбинами $p_1=16$ МПа, $t_1 = 610^\circ\text{C}$ и давлением в конденсаторе $p_k=4 \cdot 10^3$ Па. Определить удельный расход условного топлива на выработку 1 МДж электроэнергии, если к.п.д. котельной установки $\eta_{к.у} = 0,89$, к.п.д. трубопроводов $\eta_{тр} = 0,965$, относительный внутренний к.п.д. турбины $\eta_{ol}=0,835$, механический к.п.д. турбины $\eta_m=0,98$ и электрический к.п.д. генератора $\eta_r=0,98$.

5.15 Теплоэлектроцентрально израсходовала $V_{ТЭЦ} = 86 \cdot 10^6$ кг/год каменного угля с низшей теплотой сгорания $Q_n^p = 28300$ кДж/кг, выработав при этом электрической энергии $\mathcal{E}^{эвр} = 184 \cdot 10^6$ кВт./ч/год. Определить удельные расходы условного топлива на выработку 1 кВт./ч. электроэнергии и 1 МДж тепла, если расход топлива на выработку отпущенного тепла $V_Q=21,5 \cdot 10^6$ кг/год и к.п.д. ТЭЦ брутто по выработке тепла $\eta_{ТЭЦ}^{Qвр} = 0,81$.

5.16 Теплоэлектроцентрально выработала электроэнергии $\mathcal{E}^{эвр} = 56 \cdot 10^{10}$ кДж/год и отпустила тепла внешним потребителям $Q^{omn} = 5,18 \cdot 10^{11}$ кДж/год. Определить удельные расходы условного топлива на выработку 1 МДж электроэнергии и 1 МДж тепла, если расход пара из котлов $D=77,4 \cdot 10^7$ кг/год, испарительность топлива $I= 8,0$ кг/кг.

к.п.д. котельной установки $\eta_{к.у} = 0,885$ и тепловой коэффициент сжигаемого топлива $k_{экр} = 0,88$.

5.17 Определить удельный расход тепла на выработку 1 кВт·ч электроэнергии (для условного топлива) для конденсационной электростанции, если удельный расход топлива $B_{кэс} = 0,45$ кг/(кВт·ч) и тепловой эквивалент топлива $\mathcal{E}=0,8$.

5.18 Определить удельный расход тепла на выработку 1 МДж электроэнергии (условного топлива) для КЭС с тремя турбогенераторами мощностью $N=7,5 \cdot 10^3$ кВт каждый и с коэффициентом использования установленной мощности $k_{и}=0,64$, если станция израсходовала $B=670 \cdot 10^6$ кг/год каменного угля с низшей теплотой сгорания $Q_n^p = 20500$ кДж/кг.

5.19 Теплоэлектроцентраль израсходовала $B_{тэц} = 88 \cdot 10^6$ кг/год каменного угля с низшей теплотой сгорания $Q_n^p = 25700$ кДж/кг, выработав при этом электроэнергии $\mathcal{E}^{вир} = 152 \cdot 10^6$ кВт·ч/год, отпустив тепла внешним потребителям $Q^{омн} = 5,14 \cdot 10^{11}$ кДж/год. Определить удельный расход тепла на выработку 1 кВт·ч энергии (для условного топлива), если к.п.д. котельной установки $\eta_{к.у} = 0,87$.

5.20 Конденсационная электростанция выработала электроэнергии $\mathcal{E}^{вир} = 30,2 \cdot 10^{10}$ кДж/год. Определить годовой расход топлива, если известны удельный расход условного топлива на выработку 1 МДж электроэнергии $b_{кэс}^y = 0,109$ кг/МДж и тепловой эквивалент сжигаемого на КЭС топлива $\mathcal{E} = 0,84$.

5.21 Теплоэлектроцентраль выработала электроэнергии $\mathcal{E}^{вир} = 32 \cdot 10^{10}$ кДж/год и отпустила тепла внешним потребителям $Q^{омн} = 2,8 \cdot 10^{11}$ кДж/год. Определить годовой расход топлива, если удельный расход условного топлива на выработку 1 МДж электроэнергии $b_{тэц}^y = 0,104$ кг/МДж, к.п.д. ТЭЦ брутто по выработке тепла $\eta_{тэц}^{обр} = 0,85$ тепловой эквивалент сжигаемого на ТЭЦ топлива $\mathcal{E} = 0,86$.

5.22 Теплоэлектроцентраль выработала электроэнергии $\mathcal{E}^{вир} = 48 \cdot 10^{10}$ кДж/год и отпустила тепла внешним потребителям $Q^{омн} = 42 \cdot 10^{10}$ кДж/год. Определить коэффициент использования тепла топлива на ТЭЦ, если низшая теплота сжигаемого топлива $Q_n^p = 15800$ кДж/кг, расход пара из котлов $D = 61,5 \cdot 10^7$ кг/год и испарительность топлива $I = 8,2$ кг/кг.

5.23 Теплоэлектроцентраль выработала электроэнергии $\mathcal{E}^{вир} = 48 \cdot 10^{10}$ кДж/год и отпустила тепла внешним потребителям $Q^{омн} = 36 \cdot 10^{10}$ кДж/год. Определить коэффициент использования тепла топлива на ТЭЦ и расход топлива на выработку электроэнергии, если низшая теплота сжигаемого

топлива $Q_n^p = 15200$ кДж/кг, расход пара из котлов $D=61,3 \cdot 10^7$ кг/год, испарительность топлива $I=8,5$ кг/кг и к.п.д. котельной установки $\eta_{к.у} = 0,9$.

5.24 Конденсационная электростанция выработала электроэнергию $\mathcal{E}^{выр} = 100 \cdot 10^6$ кВт·ч/год, израсходовав при этом на собственные нужды 5% от выработанной энергии. Определить себестоимость 1 кВт·ч отпущенной электроэнергии, если сумма затрат на станции $\Sigma I = 7,6 \cdot 10^5$ руб./год.

5.25 Себестоимость 1 кВт·ч электроэнергии при отпуске ее $\mathcal{E}^{омн} = 120 \cdot 10^6$ кВт·ч/год равна $S_{КЭС}^{омн} = 0,7$ коп(кВт·ч). Определить себестоимость 1 кВт·ч отпущенной энергии при отпуске ее $\mathcal{E}_{1КЭС}^{омн} = 84 \cdot 10^6$ кВт·ч/год. Сумму годовых затрат на станции считать одинаковой.

5.26 К.п.д. брутто котельной установки благодаря рационализации процесса сгорания топлива увеличился от $\eta'_{ку} = 80\%$ до $\eta''_{ку} = 83\%$. Как изменили расход топлива в котельной при том же количестве вырабатываемого пара?

5.27 Станция израсходовала $B = 148,5 \cdot 10^3$ т/год торфа с $Q_n^p = 29000$ ккал/кг и выработала электроэнергию $\mathcal{E} = 100 \cdot 10^6$ кВт·ч/год, израсходовав при этом на собственные нужды 5% от выработанной электроэнергии. Определить к.п.д. брутто и к.п.д. нетто станции, выразив последний через удельные расходы тепла и натурального и условного топлива.

5.28 ТЭЦ израсходовала $B_{ТЭЦ} = 95 \cdot 10^8$ кг/год топлива, выработав при этом электроэнергию $\mathcal{E}_{выр} = 150 \cdot 10^6$ кВт·ч/год и потратив на собственные нужды 5% от выработанной энергии. Определить себестоимость 1 кВт·ч отпущенной энергии, если расход топлива на выработку электроэнергии $B_{\mathcal{E}} = 64 \cdot 10^6$ кг/год затраты на топливо $I_{топ} = 9,6 \cdot 10^5$ руб./год, затраты на амортизацию $I_{ам} = 3,4 \cdot 10^5$ руб./год, затраты на зарплату $I_{зп} = 1,37 \cdot 10^5$ руб./год и все остальные затраты $\Sigma I_{пр} = 2,63 \cdot 10^5$ руб./год.

5.29 Определить удельный расход топлива на выработку 1 МДж электроэнергии (для условного топлива) для КЭС с мощностью $225 \cdot 10^3$ кВт и с коэффициентом использования установленной мощности $k_U = 0,64$, если станция израсходовала $B = 670 \cdot 10^6$ кг/год угля с $Q_n^p = 20500$ кДж/кг.

5.30 ТЭЦ израсходовала $B_{ТЭЦ} = 90 \cdot 10^6$ кг/год угля с $Q_n^p = 28500$ КДж/кг, выработав при этом электроэнергию $\mathcal{E}_{выр} = 60 \cdot 10^{10}$ кДж/год и отпустив тепла внешним потребителям $\mathcal{E}^{омн} = 5,0 \cdot 10^{11}$ кДж/год. Определить к.п.д. ТЭЦ брутто и нетто по выработке электроэнергии и тепла, если расход электроэнергии на собственные нужды 6% от выработанной электроэнергии, к.п.д. котельной

установки $\eta_{\text{кв}} = 0,87$ и расход топлива на выработку электроэнергии для собственных нужд $B_{\text{сн}} = 4,5 \cdot 10^6$ кг/год.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица 1

Насыщенный водяной пар (по давлениям)

p в бар	t в °С	v' в м ³ /кг	v'' в м ³ /кг	ρ' в кг/м ³	ρ'' в кг/м ³	i' в кДж/кг	i'' в кДж/кг	r в кДж/кг	s' в кДж/(кг·град)	s'' в кДж/(кг·град)
0,010	6,92	0,0010001	129,9	0,00770	29,32	2513	2484	0,1054	8,975	
0,015	13,038	0,0010007	87,90	0,001138	54,75	2525	2470	0,1958	8,827	
0,020	17,514	0,0010014	66,97	0,01493	73,52	2533	2459	0,2609	8,722	
0,025	21,094	0,0010021	54,24	0,01843	88,50	2539	2451	0,3124	8,642	
0,030	24,097	0,0010028	45,66	0,02190	101,04	2545	2444	0,3546	8,576	
0,035	26,692	0,0010035	39,48	0,02533	111,86	2550	2438	0,3908	8,521	
0,040	28,979	0,0010041	34,81	0,02873	121,42	2554	2433	0,4225	8,473	
0,045	31,033	0,0010047	31,13	0,03211	130,00	2557	2427	0,4507	8,431	
0,050	32,88	0,0010053	28,19	0,03547	137,83	2561	2423	0,4761	8,393	
0,060	36,18	0,0010064	23,74	0,04212	151,50	2567	2415	0,5207	8,328	
0,070	39,03	0,0010075	20,53	0,04871	163,43	2572	2409	0,5591	8,274	
0,080	41,54	0,0010085	18,10	0,05525	173,9	2576	2402	0,5927	8,227	
0,090	43,79	0,0010094	16,20	0,06172	183,3	2580	2397	0,6225	8,186	
0,10	45,84	0,0010103	14,68	0,06812	191,9	2584	2392	0,6492	8,149	
0,11	47,72	0,0010111	13,40	0,07462	199,7	2588	2388	0,6740	8,116	
0,12	49,45	0,0010119	12,35	0,08097	207,0	2591	2384	0,6966	8,085	
0,13	51,07	0,0010126	11,46	0,08726	213,8	2594	2380	0,7174	8,057	
0,14	52,58	0,0010133	10,69	0,09354	220,1	2596	2376	0,7368	8,031	
0,15	54,00	0,0010140	10,02	0,09980	226,1	2599	2373	0,7550	8,007	
0,20	60,08	0,0010171	7,647	0,1308	251,4	2609	2358	0,8321	7,907	
0,25	64,99	0,0010199	6,202	0,1612	272,0	2618	2346	0,8934	7,830	
0,30	69,12	0,0010222	5,226	0,1913	289,3	2625	2336	0,9441	7,769	
0,40	75,88	0,0010264	3,994	0,2504	317,7	2636	2318	1,0261	7,670	
0,50	81,35	0,0010299	3,239	0,3087	340,6	2645	2204	1,0910	7,593	
0,60	85,95	0,0010330	2,732	0,3661	360,0	2653	2293	1,1453	7,531	
0,70	89,97	0,0010359	2,364	0,4230	376,8	2660	2283	1,1918	7,479	
0,80	93,52	0,0010385	2,087	0,4792	391,8	2665	2273	1,2330	7,434	
0,90	96,72	0,0010409	1,869	0,5350	405,3	2670	2265	1,2696	7,394	
1,00	99,64	0,0010432	1,694	0,5903	417,4	2675	2258	1,3026	7,360	
1,1	102,32	0,0010452	1,550	0,6453	428,9	2679	2250	1,3327	7,328	
1,2	104,81	0,0010472	1,429	0,6999	439,4	2683	2244	1,3606	7,298	
1,3	107,14	0,0010492	1,325	0,7545	449,2	2687	2238	1,3866	7,271	
1,4	109,33	0,0010510	1,236	0,8088	458,5	2690	2232	1,4109	7,246	
1,5	111,38	0,0010527	1,159	0,8627	467,2	2693	2226	1,4336	7,223	
1,6	113,32	0,0010543	1,091	0,9164	475,4	2696	2221	1,4550	7,202	
1,7	115,17	0,0010559	1,031	0,9699	483,2	2699	2216	1,4752	7,182	
1,8	116,94	0,0010575	0,9773	1,023	490,7	2702	2211	1,4943	7,163	
1,9	118,62	0,0010591	0,9290	1,076	497,9	2704	2206	1,5126	7,145	
2,0	120,23	0,0010605	0,8854	1,129	504,8	2707	2202	1,5302	7,127	
2,1	121,78	0,0010619	0,8459	1,182	511,4	2709	2198	1,5470	7,111	
2,2	123,27	0,0010633	0,8098	1,235	517,8	2711	2193	1,5630	7,096	
2,3	124,71	0,0010646	0,7768	1,287	524,0	2713	2189	1,5783	7,081	

Продолжение таблицы 1

p в бар	t в °C	v в м ³ /кг	v'' в м ³ /кг	v''' в кг/м ³	i в кДж/кг	i'' в кДж/кг	i' в кДж/кг	s в кДж/(кг·град)	s'' в кДж/(кг·град)
2,4	126,09	0,0010659	0,7465	1,340	529,8	2715	2185	1,5929	7,067
2,5	127,43	0,0010672	0,7185	1,392	535,4	2717	2182	1,6071	7,053
2,6	128,73	0,0010685	0,6925	1,444	540,9	2719	2178	1,621	7,040
2,7	129,98	0,0010697	0,6684	1,496	546,2	2721	2175	1,634	7,027
2,8	131,20	0,0010709	0,6461	1,548	551,4	2722	2171	1,647	7,015
2,9	132,39	0,0010721	0,6253	1,599	556,5	2524	2167	1,660	7,003
3,0	133,54	0,0010733	0,6057	1,651	561,4	2725	2164	1,672	6,992
3,1	134,66	0,0010744	0,5873	1,703	566,3	2727	2161	1,683	6,981
3,2	135,75	0,0010754	0,5701	1,754	571,1	2728	2157	1,695	6,971
3,3	136,82	0,0010765	0,5539	1,805	575,7	2730	2154	1,706	6,961
3,4	137,86	0,0010776	0,5386	1,857	580,2	2731	2151	1,717	6,951
3,5	138,88	0,0010786	0,5241	1,908	584,5	2732	2148	1,728	6,941
3,6	139,87	0,0010797	0,5104	1,959	588,7	2734	2145	1,738	6,932
3,7	140,84	0,0010807	0,4975	2,010	592,8	2735	2142	1,748	6,923
3,8	141,79	0,0010817	0,4852	2,061	596,8	2736	2139	1,758	6,914
3,9	142,71	0,0010827	0,4735	2,112	600,8	2737	2136	1,768	6,905
4,0	143,62	0,0010836	0,4624	2,163	604,7	2738	2133	1,777	6,897
4,1	144,51	0,0010845	0,4518	2,213	608,5	2740	2131	1,786	6,889
4,2	145,39	0,0010855	0,4416	2,264	612,3	2741	2129	1,795	6,881
4,3	146,25	0,0010865	0,4319	2,315	616,1	2742	2126	1,804	6,873
4,4	147,09	0,0010874	0,4227	2,366	619,8	2743	2123	1,812	6,865
4,5	147,92	0,0010883	0,4139	2,416	623,4	2744	2121	1,821	6,857
5,0	151,84	0,0010927	0,3747	2,669	640,1	2749	2109	1,860	6,822
6,0	158,84	0,0011007	0,3156	3,169	670,5	2757	2086	1,931	6,761
p в бар	t в °C	v в м ³ /кг	v'' в м ³ /кг	v''' в кг/м ³	i в кДж/кг	i'' в кДж/кг	i' в кДж/кг	s в кДж/(кг·град)	s'' в кДж/(кг·град)
7,0	164,96	0,0011081	0,2728	3,666	697,2	2764	2067	1,992	6,709
8,0	170,42	0,0011149	0,2403	4,161	720,9	2769	2048	2,046	6,663
9,0	175,35	0,0011213	0,2149	4,654	742,8	2774	2031	2,094	6,623
10,0	179,88	0,0011273	0,1946	5,139	762,7	2778	2015	2,138	6,587
11,0	184,05	0,0011331	0,1775	5,634	781,1	2781	2000	2,179	6,554
12,0	187,95	0,0011385	0,1633	6,124	798,3	2785	1987	2,216	6,523
13,0	191,60	0,0011438	0,1512	6,614	814,5	2787	1973	2,251	6,495
14,0	195,04	0,0011490	0,1408	7,103	830,0	2790	1960	2,284	6,469
15,0	198,28	0,0011539	0,1317	7,593	844,6	2792	1947	2,314	6,445
16,0	201,36	0,0011586	0,1238	8,080	858,3	2793	1935	2,344	6,422
17,0	204,30	0,0011632	0,1167	8,569	871,6	2795	1923	2,371	6,400
18,0	207,10	0,0011678	0,1104	9,058	884,4	2796	1912	2,397	6,379
19,0	209,78	0,0011722	0,1047	9,549	896,6	2798	1901	2,422	6,359
20,0	212,37	0,0011766	0,09958	10,041	908,5	2799	1891	2,447	6,340
21,0	214,84	0,0011809	0,09492	10,54	919,8	2800	1880	2,470	6,322
22,0	217,24	0,0011851	0,09068	11,03	930,9	2801	1870	2,492	6,305
23,0	219,55	0,0011892	0,08679	11,52	941,5	2801	1860	2,514	6,288
24,0	221,77	0,0011932	0,08324	12,01	951,8	2802	1850	2,534	6,272
25,0	223,93	0,0011972	0,07993	12,51	961,8	2802	1840	2,554	6,256
26,0	226,03	0,0012012	0,07688	13,01	971,7	2803	1831	2,573	6,242
27,0	228,06	0,0012050	0,07406	13,50	981,3	2803	1822	2,592	6,227
28,0	230,04	0,0012088	0,07141	14,00	990,4	2803	1813	2,611	6,213
29,0	231,96	0,0012126	0,06895	14,50	999,4	2803	1804	2,628	6,199
30,0	233,83	0,0012163	0,06665	15,00	1008,3	2804	1796	2,646	6,186

Продолжение таблицы 1

ρ в бар	t в °C	v' в м ³ /кг	v'' в м ³ /кг	ρ'' в кг/м ³	l' в кДж/кг	l'' в кДж/кг	r в кДж/кг	s' в кДж/(кг*град)	s'' в кДж/(кг*град)
32	237,44	0,0012238	0,06246	16,01	1025,3	2803	1778	2,679	6,161
34	240,88	0,0012310	0,05875	17,02	1041,9	2803	1761	2,710	6,137
36	244,16	0,0012380	0,05543	18,04	1057,5	2802	1745	2,740	6,113
38	247,31	0,0012450	0,05246	19,06	1072,7	2802	1729	2,769	6,091
40	250,33	0,0012520	0,04972	20,09	1087,5	2801	1713	2,796	6,070
42	253,24	0,0012588	0,04732	21,13	1101,7	2800	1698	2,823	6,049
44	256,05	0,0012656	0,04508	22,18	1115,3	2798	1683	2,849	6,029
46	258,75	0,0012724	0,04305	23,23	1128,8	2797	1668	2,874	6,010
48	261,37	0,0012790	0,04118	24,29	1141,8	2796	1654	2,898	5,991
50	263,91	0,0012857	0,03944	25,35	1154,4	2794	1640	2,921	5,973
55	269,94	0,0013021	0,03564	28,06	1184,9	2790	1604,6	2,976	5,930
60	275,56	0,0013185	0,03243	30,84	1213,9	2785	1570,8	3,027	5,890
95	307,22	0,0014345	0,01919	52,11	1385,9	2734	1348,4	3,324	5,646
100	310,96	0,0014521	0,01803	55,46	1407,7	2725	1317,0	3,360	5,615
110	318,04	0,001489	0,01598	62,58	1450,2	2705	1255,4	3,430	5,553
120	324,63	0,001527	0,01426	70,13	1491,1	2685	1193,5	3,496	5,492
130	330,81	0,001567	0,01277	78,30	1531,5	2662	1130,8	3,561	5,432
140	336,63	0,001611	0,01149	87,03	1570,8	2638	1066,9	3,623	5,372
150	342,11	0,001658	0,01035	96,62	1610	2611	1001,1	3,684	5,310
160	347,32	0,001710	0,009318	107,3	1650	2582	932,0	3,746	5,247
170	352,26	0,001768	0,008382	119,3	1690	2548	858,3	3,807	5,177
180	356,96	0,001837	0,007504	133,2	1732	2510	778,2	3,871	5,107
190	361,44	0,001921	0,00668	149,7	1776	2466	690	3,938	5,027
200	365,71	0,00294	0,00585	170,9	1827	2410	583	4,015	4,928
210	369,79	0,00221	0,00498	200,7	1888	2336	448	4,108	4,803
220	373,7	0,00273	0,00367	272,5	2016	2168	152	4,303	4,591

Примечание. Параметры критического состояния $t_{кр} = 374,15$ °C; $p_{кр} = 221,29$ бар; $v_{кр} = 0,00326$ м³/кг

**Физические параметры воды на линии насыщения
(аргумент – температура)**

t , °C	$p \cdot 10^6$, МПа	ρ , кг/м ³	C_p , кДж/(кг·К)	$\lambda \cdot 10^2$, Вт/(м·К)	$\nu \cdot 10^6$, м ² /с
10	1,01	999,7	4,2	57,5	1,306
20	1,01	998,2	4,19	60	1,006
30	1,01	995,7	4,18	61,8	0,805
40	1,01	992,2	4,18	63,4	0,659
50	1,01	988,1	4,18	64,8	0,556
60	1,01	983,2	4,18	66	0,478
70	1,01	977,8	4,19	66,8	0,415
80	1,01	971,8	4,2	67,5	0,365
90	1,01	965,3	4,21	68,1	0,326
100	1,01	958,4	4,23	68,3	0,295
110	1,43	951,0	4,24	68,6	0,272
120	1,99	943,1	4,26	68,7	0,252
130	2,7	934,8	4,27	68,7	0,233
140	3,62	926,1	4,3	68,6	0,217
150	4,76	917	4,32	68,4	0,203
160	6,18	907,4	4,35	68,3	0,191
170	7,92	897,3	4,38	68	0,181
180	10,03	886,9	4,43	67,5	0,173
190	12,55	876	4,47	67	0,165
200	15,55	863	4,5	66,4	0,158
210	19,08	852,8	4,56	65,5	0,153
220	23,01	840,1	4,62	64,4	0,148
230	27,98	827,3	4,69	63,8	0,145
240	33,48	813,6	4,77	62,8	0,141
250	39,77	799	4,85	61,8	0,137
260	46,94	784	4,96	60,6	0,135
270	55,05	767,9	5,07	59	0,133
280	64,19	750,7	5,24	57,5	0,131
290	74,45	732,3	5,5	55,8	0,129
300	85,91	712,5	5,75	54	0,128
310	98,69	691,1	6,08	52,3	0,128
320	111,91	667,1	6,58	50,6	0,128
330	128,62	640,2	7,25	48,4	0,127
340	146,1	610,1	8,17	45,7	0,127
350	165,43	574,4	9,5	43,2	0,126

Таблица 3

**Физические параметры водяного пара на линии насыщения
(аргумент – температура)**

$t,$ °C	$p \cdot 10,$ МПа	$\rho,$ кг/м ³	$C_p,$ кДж/(кг·К)	$\lambda \cdot 10^2,$ Вт/(м·К)	$\nu \cdot 10^6,$ м ² /с	Pr
100	1,01	0,598	2,13	2,37	20,02	1,08
110	1,43	0,826	2,18	2,49	15,07	1,09
120	1,99	1,121	2,21	2,59	11,46	1,09
130	2,7	1,496	2,26	2,69	8,85	1,1
140	3,61	1,966	2,31	2,79	6,89	1,12
150	4,76	2,547	2,39	2,88	5,47	1,16
160	6,18	3,258	2,48	3,1	4,39	1,18
170	7,92	4,122	2,58	3,13	3,57	1,21
180	10,03	5,157	2,71	3,27	2,93	1,25
190	12,55	6,394	2,85	3,42	2,44	1,3
200	15,55	7,862	3,02	3,55	2,03	1,36
210	19,08	9,588	3,2	3,72	1,71	1,41
220	23,2	11,62	3,41	3,9	1,45	1,47
230	27,98	13,99	3,63	4,09	1,24	1,54
240	33,45	16,76	3,88	4,29	1,06	1,61
250	39,78	19,98	4,16	4,51	0,91	1,68
260	46,94	23,72	4,47	4,8	0,79	1,75
270	55,05	28,09	4,81	5,11	0,69	1,82
280	64,19	33,19	5,23	5,49	0,6	1,9
290	74,44	39,15	5,7	5,83	0,53	2,01
300	85,92	46,21	6,28	6,27	0,46	2,13
320	112,9	64,72	8,22	7,52	0,35	2,3
340	146,11	92,76	12,35	9,3	0,27	3,35
360	186,72	144,1	23,02	12,81	0,2	5,23

Таблица 4

**Физические параметры дымовых газов
при давлении $P=101$ кПа
(объемный состав $CO_2=13\%$, $H_2O=11\%$, $N_2=76\%$)**

t , $^{\circ}C$	ρ , кг/м ³	C_p , кДж/(кг·К)	$\lambda \cdot 10^2$, Вт/(м·К)	$\mu \cdot 10^5$, н·с/м ²	$\nu \cdot 10^6$, м ² /с	Pr
100	0,95	1,068	3,128	20,39	21,54	0,69
200	0,747	1,097	4,012	24,49	32,8	0,67
300	0,617	1,122	4,838	28,22	45,81	0,65
400	0,525	1,151	5,699	31,97	60,38	0,64
500	0,457	1,185	6,559	34,84	76,3	0,63
600	0,405	1,214	7,41	37,85	93,61	0,62
700	0,363	1,239	8,269	40,67	112,1	0,61
800	0,329	1,264	9,153	43,36	131,81	0,6
900	0,301	1,289	10,013	45,89	152,52	0,59
1000	0,275	1,306	10,097	48,34	174,3	0,58
1100	0,257	1,323	11,746	50,69	197,11	0,57
1200	0,24	1,34	12,616	52,97	221,02	0,56

Таблица 5

**Физические параметры сухого воздуха
при давлении $P=101$ кПа, $C_p=1,01$ кДж/(кг·К)
(объемный состав $CO_2=13\%$, $H_2O=11\%$, $N_2=76\%$)**

t , $^{\circ}C$	ρ , кг/м ³	$\lambda \cdot 10^2$, Вт/(м·К)	$\nu \cdot 10^6$, м ² /с	Pr
0	1,293	2,44	13,28	0,707
10	1,247	2,51	14,16	0,705
20	1,205	2,59	15,06	0,703
30	1,165	2,67	16,00	0,701
40	1,128	2,76	16,96	0,699
50	1,093	2,83	17,95	0,698
60	1,060	2,90	18,97	0,696
70	1,029	2,96	20,02	0,694
80	1,000	3,05	21,09	0,692
90	0,972	3,13	22,10	0,690
100	0,946	3,21	23,13	0,688
120	0,898	3,34	25,45	0,686
140	0,854	3,49	27,80	0,684
160	0,815	3,64	30,09	0,682
180	0,779	3,78	32,49	0,681
200	0,746	3,93	34,85	0,680

Таблица 6

Физические свойства масла МК в зависимости от температуры

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho,$ кг/м^3	$c_p,$ $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$	$\lambda,$ $\text{Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$	$\mu\cdot 10^4,$ $\text{Па}\cdot\text{с}$	$\nu\cdot 10^6,$ $\text{м}^2/\text{с}$	$a\cdot 10^8,$ $\text{м}^2/\text{с}$	$\beta\cdot 10^4,$ K^{-1}	Pr
10	911.0	1.645	0.1510	35414	3883	9.94	8.56	39000
20	903.0	1.712	0.1485	18560	1514	9.58	8.64	15800
30	894.5	1.758	0.1461	6180	691.2	9.28	8.71	7450
40	887.5	1.804	0.1437	3031	342.0	8.97	8.79	3810
50	879.0	1.851	0.1413	1638	186.2	8.69	8.86	2140
60	871.5	1.897	0.1389	961.4	110.6	8.39	8.95	1320
70	864.0	1.943	0.1363	603.3	69.3	8.14	9.03	858
80	856.0	1.989	0.1340	399.3	46.6	7.89	9.12	591
90	848.2	2.035	0.1314	273.7	32.3	7.61	9.20	424
100	840.7	2.081	0.1290	202.1	24.0	7.33	9.28	327
110	838.0	2.127	0.1264	145.2	17.4	7.11	9.37	245
120	825.0	2.173	0.1240	110.4	13.4	6.92	9.46	193.5
130	817.0	2.219	0.1214	87.31	10.7	6.69	9.54	160.0
140	809.2	2.265	0.1188	70.34	8.70	6.53	9.65	133.3
150	801.6	2.311	0.1168	56.90	7.10	6.25	9.73	113.5

ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА

Баскаков А.П. и др. Теплотехника: Учебник для вузов.- М.: ООО <<ИД «БАСТЕТ»>>, 2010-328с.: Ил.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

2. Ривкин С.Л., Александров А.А. Термодинамические свойства воды и водяного пара: Справ. М.: Энергия, 1979. – 463с.

3. Теплотехнический справочник/Под ред. В.Н. Юренева, П.Д. Лебедева: М.: Энергия, 1976.

ЗАДАНИЯ К КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЕ ПО ДИСЦИПЛИНЕ
«ОСНОВЫ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКИ»
И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ЕЕ ВЫПОЛНЕНИЯ

Подписано в печать Формат 60 × 84 / 16. Бумага для множ. аппаратов.
Печать плоская. Усл. печ. л. Уч. - изд. л. Тираж экз.
ФГАОУ ВПО «Российский государственный профессионально-
педагогический университет». Екатеринбург, ул. Машиностроителей, 11

Ризограф ФГАОУ ВПО РГППУ. Екатеринбург, ул. Машиностроителей, 11