

Министерство образования и науки Российской Федерации
Саратовский государственный технический университет

ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА

Методические указания
к выполнению расчетно-графической работы
по дисциплине «Техническая теплотехника»
для студентов специальности 270109.105
всех форм обучения

*Одобрено
редакционно-издательским советом
Саратовского государственного
технического университета*

Электронное издание локального распространения

Саратов 2014

Все права на размножение и распространение в любой форме остаются за разработчиком.
Нелегальное копирование и использование данного продукта запрещено.

Составили: МАЛАЯ Элла Максовна
ГОЛИКОВ Дмитрий Викторович

Рецензент: В.А. Стрельников

Редактор К.А. Кулагина
Компьютерная верстка Т.В. Семёновой

Регистрационный номер 14023Э

410054, Саратов, ул. Политехническая, 77
Научно-техническая библиотека СГТУ
Тел. 99-86-55; 99-86-56; 99-86-52
<http://lib.sstu.ru>

© Саратовский государственный
технический университет, 2014

ВВЕДЕНИЕ

Теплотехника – это общеинженерная дисциплина, изучающая методы получения, преобразования, передачи и использования теплоты и связанные с этим аппараты и устройства.

Дисциплина «Техническая теплотехники» включают несколько изучаемых студентами на более ранних этапах дисциплин, таких как техническая термодинамика и теплопередача.

Техническая термодинамика изучает закономерность взаимного превращения тепловой и механической энергии и свойства тел, участвующих в этих превращениях.

Теплопередача изучает законы самопроизвольного переноса теплоты в телах и системах тел.

Теплоэнергетические установки – теплоэнергетика – отрасль теплотехники, занимающаяся преобразованием теплоты в другие виды энергии, главным образом в механическую (ТЭЦ, котельные) и через неё в электрическую (ТЭЦ).

Для практического закрепления материала, излагаемого на лекциях, служит предлагаемая ниже контрольная работа, состоящая из нескольких задач, охватывающих материал данного курса. Выполняя ее, студенты получают навыки, которые в дальнейшем могут быть применены для курсового и дипломного проектирования по специальности.

ВЫБОР ВАРИАНТА ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКОЙ РАБОТЫ

Контрольная работа содержит семь заданий, в каждом из них вначале приведен краткий теоретический материал по теме задачи, а затем пример решения. В конце задачи содержатся варианты заданий. Выбор варианта следует принимать, исходя из номера по списку в журнале.

1. Термодинамические процессы. Расчет процесса идеального газа

К основным т/д процессам относятся: *изохорный* ($V = \text{const}$); *изотермический* ($T = \text{const}$); *изобарный* ($p = \text{const}$); *адиабатный* ($pV^k = \text{const}$). Все они являются частным случаем *политропного* процесса ($pV^n = \text{const}$).

Идеальный газом называется такой газ, у которого взаимодействием молекул между собой и размерами молекул можно пренебречь. Уравнение состояния идеального газа было получено Клапейроном путем объединения законов Бойля–Мариотта и Гей-Люссака – $pv/T = \text{const}$. Обозначим константу через R , получим;

$$pv = RT,$$

где R – универсальная газовая постоянная, отнесенная к массе газа, равной 1 кг, Дж/(кг*К).

Расчетные формулы для термодинамических процессов идеального газа приведены в табл. 1:

Таблица 1

Процесс	Связи параметров	Работа изменения объема	Внешняя работа	Теплота
Изобарный	$\frac{v_2}{v_1} = \frac{T_2}{T_1}$	$\omega = p(v_2 - v_1)$	$\ell = 0$	$q = h_2 - h_1$
Изохорный	$\frac{p_2}{p_1} = \frac{T_2}{T_1}$	$\omega = 0$	$\ell = v(p_1 - p_2)$	$q = u_2 - u_1$
Адиабатный	$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{\kappa}$ $\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$ $\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{\kappa-1}$	$\omega = \frac{1}{\kappa-1} R(T_1 - T_2)$	$\ell = \kappa \cdot \omega$	$q = 0$
Полиτροпный	$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^n$ $\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}$ $\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{n-1}$	$\omega = \frac{1}{n-1} R(T_1 - T_2)$	$\ell = n \cdot \omega$	$q = c_n(T_2 - T_1)$ $c_n = c_v \frac{n - \kappa}{n - 1}$

Связь между изохорной и изобарной теплоемкостями характеризуется законом Майера:

$$c_p - c_v = R, \quad \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}, \quad \mu c_p - \mu c_v = R_\mu = 8314 \frac{\text{Дж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}}.$$

Молекулярно-кинетическая теория теплоемкости дает постоянное значение теплоемкости для *одноатомных идеальных газов*

$$\mu c_v = 12,48 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}},$$

и приближенные значения теплоемкости для *двухатомных идеальных газов*

$$\mu c_v = 20,8 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}};$$

для *трех- и многоатомных идеальных газов*

$$\mu c_v = 29,1 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}}.$$

Задача 1. Пример решения

Дано: гелий ($\mu_{\text{не}} = 4 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}$) с параметрами $p_1 = 20$ бар, $t_1 = 700^\circ\text{C}$

расширяется в политропном процессе до давления $p_2 = 5$ бар. Показатель политропы $n = 1,73$.

Определить работу изменения объема ω , внешнюю работу ℓ и теплоту q процесса. Представить процесс в p - v и T - s диаграммах.

Решение:

Расчетные формулы для политропного процесса даны в табл. 1. Температура гелия в конце расширения

$$T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} = 973 \left(\frac{5}{20} \right)^{1,73-1} = 542,1\text{K}.$$

Работа изменения объема

$$\omega = \frac{1}{n-1} R(T_1 - T_2) = \frac{1}{1,73-1} \cdot \frac{8,314}{4} (973 - 542,1) = 1227 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Внешняя работа процесса

$$\ell = n \cdot \omega = 1,73 \cdot 1227 = 2123 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Гелий – одноатомный идеальный газ, для которого теплоемкость и показатель адиабаты – постоянные величины, не зависящие от температуры:

$$\mu c_v = 12,48 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль} \cdot \text{K}},$$

$$\kappa = \frac{c_p}{c_v} = 1,67 \text{ (выражается из уравнения Майера).}$$

Теплота политропного процесса

$$q = c_v \frac{n - \kappa}{n - 1} (T_2 - T_1) = \frac{12,48}{4} \frac{1,73 - 1,67}{1,73 - 1} (542,1 - 973) = -110,5 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Построение процесса в диаграммах p - v и T - s производится по исходным данным. Начальное состояние (точка 1) располагается на пересечении параметров p_1 и t_1 , конечное состояние (точка 2) – на изобаре p_2 . Направление политропного процесса определяется путем сравнения показателя политропы $n=1,73$ с $n=1$ (для изотермического процесса) и $n=\kappa$ (для адиабатного процесса).

Так как $n>1$ и $n>\kappa$, политропный процесс в p - v -диаграмме – несимметричная гипербола, располагается круче изотермы и адиабаты, в T - s диаграмме – логарифмическая кривая, пересекающая изобару p_2 левее адиабаты (рис. 1).

Работа изменения объема ω , внешняя работа ℓ и теплота q процесса на диаграммах характеризуются заштрихованными площадями. Работа ℓ и ω положительна, так как уменьшается давление ($p_2 < p_1$), увеличивается

объем ($v_2 > v_1$). Теплота q отводится (отрицательна), т.к. уменьшается энтропия ($s_2 < s_1$), что согласуется с результатами расчета.

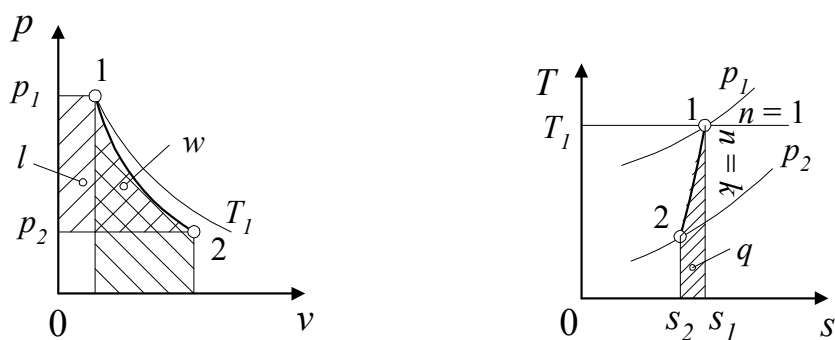


Рис. 1

Варианты заданий

	p_1	p_2	t_1	n
1	22	7	680	1.74
2	37	22	716	1.82
3	39	25	688	1.83
4	25	9	695	1.76
5	38	12	702	1.82
6	29	15	685	1.78
7	30	16	712	1.78
8	24	8	709	1.75
9	31	16	720	1.79
10	26	10	706	1.76
11	35	19	681	1.81
12	21	7	692	1.74
13	32	18	710	1.79
14	28	14	718	1.77
15	36	21	777	1.8
16	33	17	715	1.8
17	23	9	701	1.75
18	19	5	775	1.72
19	34	20	725	1.81
20	27	12	686	1.77

2. ГАЗОВЫЕ СМЕСИ

Газовой смесью называется смесь отдельных газов, не вступающих между собой ни в какие химические реакции. Каждый газ (компонент) в смеси независимо от других газов полностью сохраняет все свои свойства и ведет себя так, как если бы он один занимал весь объем смеси.

Исходя из предыдущего определения:

Парциальное давление – это давление, которое имел бы каждый газ, входящий в состав смеси, если бы этот газ находился один в том же количестве, в том же объеме и при той же температуре, что и в смеси.

Если смесь находится в равновесном состоянии, то температура всех газов одинакова и равна температуре смеси $T_{см}$.

Общая масса смеси равна сумме масс компонентов;

Общее давление смеси газов равно сумме парциальных давлений отдельных газов, составляющих смесь – закон Дальтона.

$$m_{см} = \sum_{i=1}^n m_i \quad ; \quad p_{см} = \sum_{i=1}^n p_i$$

где n – число газов, составляющих смесь.

Массовой долей компонента m_i называют отношение массы газа M_i , входящего в смесь, к массе всей смеси $M_{см}$:

$$g_i = \frac{m_i}{m_{см}}$$

При этом сумма массовых долей компонентов газовой смеси равна 1:

$$g_1 + g_2 + \dots + g_n = \sum_{i=1}^n g_i = 1$$

Объемной долей компонента r_i называют отношение парциального объема газа V_i , входящего в смесь, к объему всей смеси $V_{см}$:

$$r_i = \frac{V_i}{V_{см}}$$

Сумма объемных долей компонентов газовой смеси равна 1:

$$r_1 + r_2 + \dots + r_n = \sum_{i=1}^n r_i = 1$$

Молярной долей компонента r_i' называют отношение количества киломолей ν i -го газа к количеству киломолей всей смеси $\nu_{см}$:

$$r_i' = \frac{\nu_i}{\nu_{см}}$$

Соответственно

$$r_1' + r_2' + \dots + r_n' = \sum_{i=1}^n r_i' = 1$$

Для идеального газа по закону Дальтона:

$$r_1 = r_1'; \quad r_2 = r_2'; \quad \dots \quad r_n = r_n'.$$

Для действительного состояния связь между параметрами определяется уравнением $p_i V_{см} = m_i R_i T_{см}$, а для условного – $p_{см} V_i = m_i R_i T_{см}$. Из равенства правых частей этих уравнений следует $p_i V_{см} = p_{см} V_i$,

откуда находим

$$V_i = \frac{V_{см} p_i}{p_{см}} \quad \text{и} \quad p_i = \frac{p_{см} V_i}{V_{см}} = p_{см} r_i.$$

Соотношение между массовой m_i , объемной g_i и молярной r_i долями:

$$r_i = r'_i = g_i \frac{R_i}{R_{см}}$$

Теплоемкость смесей:

$$c_{рсм} = \sum_{i=1}^n g_i c_{pi} \text{ и } c_{вс} = \sum_{i=1}^n g_i c_{vi}$$

Газовая постоянная смеси:

$$R_{см} = \sum_{i=1}^n g_i R_i \text{ или } R_{см} = \frac{8314}{\mu_{см}}$$

Задача 2. Пример решения

Задан объемный состав газовой смеси: r_{CH_4} , r_{CO_2} , r_{CO} . Определить массовый и мольный составы смеси, кажущуюся молекулярную массу, газовую постоянную, удельный объём и плотность смеси при давлении смеси p и температуре смеси t . Определить также массовую, объемную и мольную теплоемкость смеси. При этом считать теплоемкость не зависящей от температуры, а мольные теплоемкости компонентов соответственно равны:

$$(\mu c_p)_{CH_4} = 37,7 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}};$$

$$(\mu c_p)_{CO_2} = 37,7 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}};$$

$$(\mu c_p)_{CO} = 29,3 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}}.$$

Массовая c и объёмная c' теплоемкости связаны с мольной соответственно соотношениями:

$$c = \frac{(\mu c_p)}{\mu} \frac{\text{кДж}}{\text{кг}};$$

$$c' = \frac{(\mu c_p)}{22,4} \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}.$$

Дано: $r_{CH_4} = 0,13$; $r_{CO_2} = 0,27$; $r_{CO} = 0,6$; $p = 0,12 \text{ МПа}$; $t = 70^\circ\text{C}$.

Решение:

Находим молекулярную массу компонентов смеси:

$$\mu_{CH_4} = \mu_C + 4\mu_H = 12 + 4 = 16 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}};$$

$$\mu_{CO_2} = \mu_C + 2\mu_O = 12 + 2 \cdot 16 = 44 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}};$$

$$\mu_{CO} = \mu_C + \mu_O = 12 + 16 = 28 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}.$$

Находим кажущуюся молекулярную массу смеси:

$$\begin{aligned}\mu_{\text{см}} &= \mu_{\text{CH}_4} r_{\text{CH}_4} + \mu_{\text{CO}_2} r_{\text{CO}_2} + \mu_{\text{CO}} r_{\text{CO}} = \\ &= 16 \cdot 0,13 + 44 \cdot 0,27 + 28 \cdot 0,6 = 30,76 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}.\end{aligned}$$

Определим массовые доли компонентов смеси:

$$\begin{aligned}m_{\text{CH}_4} &= \frac{(\mu_{\text{CH}_4} r_{\text{CH}_4})}{\mu_{\text{см}}} = \frac{(16 \cdot 0,13)}{30,79} = 0,068; \\ m_{\text{CO}_2} &= \frac{(\mu_{\text{CO}_2} r_{\text{CO}_2})}{\mu_{\text{см}}} = \frac{(44 \cdot 0,27)}{30,79} = 0,386; \\ m_{\text{CO}} &= \frac{(\mu_{\text{CO}} r_{\text{CO}})}{\mu_{\text{см}}} = \frac{(28 \cdot 0,6)}{30,79} = 0,546.\end{aligned}$$

Проверка:

$$m_{\text{CH}_4} + m_{\text{CO}_2} + m_{\text{CO}} = 0,068 + 0,386 + 0,546 = 1.$$

Находим мольные доли компонентов смеси.

Так как мольный состав смеси совпадает с объёмным, то мольные доли равны:

$$\begin{aligned}n_{\text{CH}_4} &= r_{\text{CH}_4} = 0,13; \\ n_{\text{CO}_2} &= r_{\text{CO}_2} = 0,27; \\ n_{\text{CO}} &= r_{\text{CO}} = 0,6.\end{aligned}$$

Газовая постоянная смеси

$$R_{\text{см}} = \frac{R_0}{\mu_{\text{см}}} = \frac{8314}{30,76} = 270,3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}},$$

где $R_0 = 8314 \frac{\text{Дж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}}$ – универсальная газовая постоянная.

Удельный объем смеси находим, используя уравнение состояния идеального газа:

$$\begin{aligned}p g_{\text{см}} &= RT = R(t + 273); \\ g_{\text{см}} &= \frac{R(t + 273)}{p} = \frac{270,3 \cdot (70 + 273)}{0,12 \cdot 10^6} = 0,773 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}.\end{aligned}$$

Плотность смеси

$$\rho_{\text{см}} = \frac{1}{g_{\text{см}}} = \frac{1}{0,773} \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

Мольная изобарная теплоемкость смеси

$$\begin{aligned}(\mu c_p)_{\text{см}} &= (\mu c_p)_{\text{CH}_4} r_{\text{CH}_4} + (\mu c_p)_{\text{CO}_2} r_{\text{CO}_2} + (\mu c_p)_{\text{CO}} r_{\text{CO}} = \\ &= 37,7 \cdot 0,13 + 37,7 \cdot 0,27 + 29,3 \cdot 0,6 = 32,66 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}}.\end{aligned}$$

Массовая изобарная теплоемкость

$$c_{p \text{ см}} = \frac{(\mu c_p)_{\text{см}}}{\mu_{\text{см}}} = \frac{32,66}{30,76} = 1,06 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Объемная изобарная теплоемкость

$$c'_{p\text{см}} = \frac{(\mu c_p)_{\text{см}}}{22,4} = \frac{32,66}{22,4} = 1,46 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}}.$$

Мольная изохорная теплоемкость смеси

$$(\mu c_v)_{\text{см}} = (\mu c_p)_{\text{см}} - R_0 = 32,66 - 8,314 = 24,35 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}}.$$

Массовая изохорная теплоемкость смеси

$$c_{v\text{см}} = \frac{(\mu c_v)_{\text{см}}}{\mu_{\text{см}}} = \frac{24,35}{30,76} = 0,791 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Объемная изохорная теплоемкость смеси

$$c'_{v\text{см}} = \frac{(\mu c_v)_{\text{см}}}{22,4} = \frac{24,35}{22,4} = 1,087 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}}.$$

Варианты заданий

Вариант	r_{CH_4}	r_{CO_2}	r_{CO}	P , МПа	t , °С
1	0,10	0,60	0,30	0,10	0
2	0,15	0,50	0,35	0,15	10
3	0,20	0,40	0,40	0,20	20
4	0,25	0,50	0,25	0,25	30
5	0,30	0,60	0,10	0,30	40
6	0,35	0,50	0,15	0,35	50
7	0,40	0,40	0,20	0,40	60
8	0,45	0,30	0,25	0,35	70
9	0,50	0,20	0,30	0,30	80
10	0,55	0,10	0,35	0,25	90
11	0,60	0,10	0,30	0,20	100
12	0,65	0,20	0,15	0,15	90
13	0,65	0,25	0,10	0,10	80
14	0,60	0,20	0,20	0,15	70
15	0,50	0,10	0,40	0,20	60
16	0,50	0,20	0,30	0,25	50
17	0,40	0,30	0,30	0,30	40
18	0,40	0,40	0,20	0,35	30
19	0,30	0,30	0,40	0,40	20
20	0,30	0,40	0,30	0,45	10

3. ГОРЕНИЕ ТОПЛИВА

Топливом называется горючее вещество, которое используется для получения тепла в энергетических, промышленных и отопительных установках.

Классификация топлива:

1. По методу получения – естественное (дрова, торф, каменный уголь, нефть) и искусственное (кокс, бензин, генераторный газ).

2. По агрегатному состоянию – твердые, жидкие и газообразные (каменные угли, торф; керосин, дизельное топливо; природный горючий газ)

Компонентами любого топлива являются горючие элементы и негорючие примеси или балласт. **К горючим элементам** топлива относятся: углерод C , водород H и горючая сера S , образующие вместе с внутренним балластом (кислород O и азот N) сложные химические соединения. **Негорючие примеси** (внешний балласт) составляют зола A и влага W .

Горение топлива – химическая реакция соединения горючих элементов топлива с окислителем при высокой температуре, сопровождающийся интенсивным выделением теплоты.

В качестве окислителя используют *кислород воздуха*.

Расчет горения топлива. Целью расчета горения является определение:

- расхода окислителя на единицу топлива (m^3 или $кг$);
- выхода продуктов сгорания на единицу топлива;
- состава продуктов сгорания, %.

Задача 3. Пример решения

Задан состав твердого топлива на рабочую массу в %. Определить теоретически необходимое количество воздуха для горения, а также по формуле Д.И. Менделеева – низшую и высшую теплоту сгорания топлива, объемы и состав продуктов сгорания при α_v , а также энтальпию продуктов сгорания при температуре ϑ .

Дано: $W^P = 13,2$; $A^P = 22,8$; $S^P = 3,1$; $C^P = 50,0$; $H^P = 3,8$; $N^P = 1,2$; $O^P = 5,9$; $\alpha_g = 1,2$; $\vartheta = 200^\circ C$.

Решение:

Теоретически необходимое количество воздуха для полного сгорания 1 кг топлива вычисляется по формуле

$$V^0 = 0,089C^P + 0,226H^P + 0,033(S^P - O^P) =$$

$$= 0,089 \cdot 50,0 + 0,226 \cdot 3,8 + 0,033(3,1 - 5,9) = 5,2 \frac{M^3}{кг}.$$

Действительное необходимое количество воздуха

$$V_d = \alpha_v V^0 = 1,2 \cdot 5,2 = 6,2 \frac{M^3}{кг}.$$

Низшая теплота сгорания 1 кг топлива по формуле Д.И. Менделеева

$$Q_H^P = 338C^P + 1025H^P - 108,5(O^P - S^P) - 25 \cdot W^P =$$

$$= 338 \cdot 50,0 + 1025 \cdot 3,8 - 108,5 \cdot (5,9 - 3,1) - 25 \cdot 13,2 = 20161 \frac{кДж}{кг}.$$

Высшая теплота сгорания

$$Q_B^P = Q_H^P + 225H^P + 25W^P = 20161 + 225 \cdot 3,8 + 25 \cdot 13,2 = 21346 \frac{кДж}{кг}.$$

Теоретические объемы продуктов полного сгорания твердых топлив при $\alpha_v = 1$ определяются по формулам:

–объем трехатомных газов

$$V_{\text{RO}_2} = 0,0187(C^{\text{P}} + 0,375S^{\text{P}}) = 0,0187(50,0 + 0,375 \cdot 3,1) = 0,96 \frac{\text{M}^3}{\text{кг}};$$

– объем азота

$$V_{\text{N}_2}^0 = 0,79V^0 + 0,8 \frac{N^{\text{P}}}{100} = 0,79 \cdot 5,2 + 0,8 \frac{1,2}{100} = 4,12 \frac{\text{M}^3}{\text{кг}};$$

– объем сухих газов

$$V_{\text{сг}}^0 = V_{\text{RO}_2} + V_{\text{N}_2}^0 = 0,96 + 4,12 = 5,08 \frac{\text{M}^3}{\text{кг}};$$

– объем водяных паров

$$\begin{aligned} V_{\text{H}_2\text{O}}^0 &= 0,111H^{\text{P}} + 0,0124W^{\text{P}} + 0,0161V^0 = \\ &= 0,111 \cdot 3,8 + 0,0124 \cdot 13,2 + 0,0161 \cdot 5,2 = 0,67 \frac{\text{M}^3}{\text{кг}}. \end{aligned}$$

Полный объем газообразных продуктов сгорания 1 кг топлива при $\alpha_{\text{B}} = 1$

$$V_{\Gamma}^0 = V_{\text{сг}}^0 + V_{\text{H}_2\text{O}}^0 = 5,08 + 0,67 = 5,75 \frac{\text{M}^3}{\text{кг}}.$$

Объем продуктов сгорания при $\alpha_{\text{B}} = 1,2$ определяется по формулам:

– объем сухих газов

$$V_{\text{сг}} = V_{\text{сг}}^0 + (\alpha_{\text{B}} - 1)V^0 = 5,08 + (1,2 - 1) \cdot 5,2 = 6,12 \frac{\text{M}^3}{\text{кг}};$$

– объем водяных паров

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = V_{\text{H}_2\text{O}}^0 + 0,0161(\alpha_{\text{B}} - 1) \cdot V^0 = 0,67 + 0,0161(1,2 - 1) \cdot 5,2 = 0,69 \frac{\text{M}^3}{\text{кг}}.$$

Полный объем продуктов сгорания

$$V_{\Gamma} = V_{\text{сг}} + V_{\text{H}_2\text{O}} = 6,12 + 0,69 = 6,81 \frac{\text{M}^3}{\text{кг}}.$$

Энтальпия продуктов сгорания, $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$, при $\alpha_{\text{B}} = 1$ и температуре газов

$\vartheta = 200^{\circ}\text{C}$ находится по формуле

$$H_{\Gamma}^0 = V_{\text{CO}_2} (c\vartheta)_{\text{CO}_2} + V_{\text{N}_2}^0 (c\vartheta)_{\text{N}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}}^0 (c\vartheta)_{\text{H}_2\text{O}},$$

где $(c\vartheta)_{\text{CO}_2}$, $(c\vartheta)_{\text{N}_2}$, $(c\vartheta)_{\text{H}_2\text{O}}$ – энтальпия соответственно 1M^3 углекислого газа, азота и водяных паров (находится по табл. 2 при $\vartheta = 200^{\circ}\text{C}$):

$$(c\vartheta)_{\text{CO}_2} = 357 \frac{\text{кДж}}{\text{M}^3};$$

$$(c\vartheta)_{\text{N}_2} = 260 \frac{\text{кДж}}{\text{M}^3};$$

$$(c\vartheta)_{\text{H}_2\text{O}} = 304 \frac{\text{кДж}}{\text{M}^3}.$$

Подставляя найденные значения энтальпии в уравнение (3.1), получаем

$$H_{\Gamma}^0 = 0,96 \cdot 357 + 4,12 \cdot 260 + 0,67 \cdot 304 = 1617,6 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Энтальпия воздуха, $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$:

$$H_{\text{В}}^0 = V^0 (c_{\mathcal{G}})_{\text{В}},$$

где $(c_{\mathcal{G}})_{\text{В}}$ – энтальпия воздуха при $\mathcal{G} = 200^{\circ}\text{C}$ (см. табл. 2).

$$H_{\text{В}}^0 = 5,2 \cdot 266 = 1383,2 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Энтальпия продуктов сгорания при $\alpha_{\text{В}} = 1,2$ и $\mathcal{G} = 200^{\circ}\text{C}$

$$H_{\Gamma} = H_{\Gamma}^0 + (\alpha_{\text{В}} - 1)H_{\text{В}}^0 = 1617,6 + (1,2 - 1)1383,2 = 1894,2 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Таблица 2

Энтальпии газов, воздуха и золы

$\mathcal{G},^{\circ}\text{C}$	$(c_{\mathcal{G}})_{\text{CO}_2}$	$(c_{\mathcal{G}})_{\text{N}_2}$	$(c_{\mathcal{G}})_{\text{H}_2\text{O}}$	$(c_{\mathcal{G}})_{\text{В}}$	$(c_{\mathcal{G}})_{\text{ЗЛ}}$
	кДж / м ³				кДж / кг
100	171,1	130,1	150,5	132,7	80,8
200	360,0	261,0	304,0	267,0	169,1
300	563	394	463	403	264
400	776	529	626	542	360
500	999	667	795	685	458
600	1231	808	969	830	560
700	1469	952	1149	979	662
800	1712	1098	1334	1129	767
900	1961	1247	1526	1283	857
1000	2210	1398	1723	1483	984
1100	2458	1551	1925	1595	1097
1200	2717	1705	2132	1754	1206
1300	2977	1853	2344	1914	1361
1400	3239	2009	2559	2076	1583
1500	3503	2166	2779	2239	1759
1600	3769	2324	3002	2403	1876
1700	4036	2484	3229	2567	2064
1800	4305	2644	3458	2732	2186
1900	4574	2804	3690	2899	2387
2000	4844	2965	3926	3066	2512
2100	5115	3127	4163	3234	–
2200	5386	3289	4402	3402	–
2300	5658	3452	4643	3571	–
2400	5930	3615	4888	3740	–
2500	6203	3778	5132	3910	–

Варианты заданий

Вариант	W^p	A^p	S^p	C^p	H^p	N^p	O^p	α_B	$\vartheta, ^\circ\text{C}$
1	13,0	21,8	3,0	49,3	3,6	1,0	8,3	1,1	120
2	14,0	25,8	3,9	44,8	3,4	1,0	7,1	1,2	130
3	8,0	23,0	3,2	55,2	3,8	1,0	5,8	1,3	140
4	11,0	26,7	3,1	49,2	3,4	1,0	5,6	1,4	150
5	9,0	34,6	3,2	44,0	3,1	0,8	5,3	1,3	160
6	12,0	13,2	0,3	58,7	4,2	1,9	9,7	1,2	170
7	8,5	11,0	0,5	66,0	4,7	1,8	7,5	1,1	180
8	9,0	18,2	0,3	61,5	3,7	1,5	5,8	1,2	190
9	6,5	16,8	0,4	68,6	3,1	1,5	3,1	1,3	200
10	7,0	30,7	0,7	53,6	3,0	1,6	3,4	1,4	210
11	14,0	9,5	0,5	59,5	4,0	1,5	11,0	1,5	220
12	10,0	13,5	0,5	67,7	3,6	1,6	5,3	1,6	230
13	12,0	18,9	0,4	59,1	3,4	1,7	4,5	1,5	240
14	32,0	25,2	2,7	28,7	2,2	0,6	8,6	1,4	250
15	5,5	23,6	0,8	59,6	3,8	1,3	5,4	1,3	260
16	10,0	19,8	2,6	55,5	3,7	0,9	7,5	1,2	270
17	6,0	31,0	6,1	48,5	3,6	0,8	4,0	1,1	280
18	18,0	29,5	1,0	37,3	2,8	0,9	10,5	1,2	290
19	8,0	23,9	0,4	60,3	2,5	0,9	4,0	1,3	300
20	8,0	9,2	0,6	67,9	4,7	0,8	8,8	1,4	310

4. СЖАТИЕ ВОЗДУХА. КОМПРЕССОРЫ

Компрессоры предназначены для сжатия и перемещения газов.

Рассмотрим работу наиболее простого по конструкции поршневого компрессора (рис. 2).

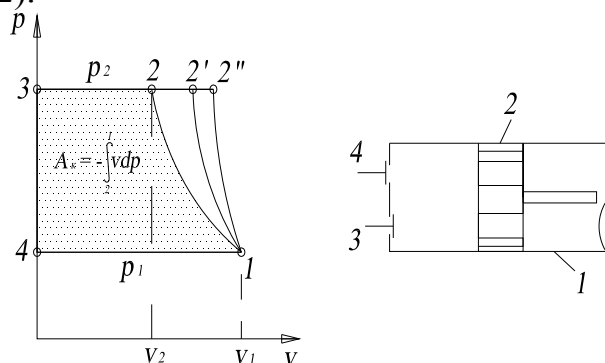


Рис. 2. Поршневой компрессор: 1 – цилиндр; 2 – поршень;
3 – всасывающий клапан; 4 – нагнетательный клапан

Рабочий процесс совершается за два хода поршня или за один оборот коленчатого вала. При движении поршня вправо через открытый всасывающий клапан газ поступает в цилиндр. При обратном движении поршня влево всасывающий клапан закрывается и происходит сжатие газа до определенного давления, при котором открывается нагнетательный клапан и производится нагнетание газа в резервуар.

Если сжатый газ полностью выталкивается поршнем, компрессор называется *идеальным*. p - v диаграмма такого компрессора изображена выше.

- $4-1$ – линия всасывания,
- $1-2$ – изотермический процесс сжатия,
- $1-2''$ – адиабатный процесс сжатия,
- $1-2'$ – политропный процесс сжатия,
- $2-3$ – линия нагнетания,
- $3-4$ – условная линия, замыкающая цикл.

Линии всасывания $4-1$ и нагнетания $2-3$ не изображают термодинамические процессы, т.к. меняется количество рабочего тела, а не его состояние.

Задача 4. Пример решения

V_1 , м³ газа с начальным давлением p_1 и начальной температурой t_1 сжимается до изменения объема в ε раз. Сжатие происходит по изотерме, адиабате и политропе с показателем политропы n .

Определить массу газа, конечный объем, температуру, работу сжатия, количество отведенной теплоты, изменение внутренней энергии и энтропии газа для каждого из процессов. Изобразить процессы сжатия в p, v и T, s -диаграммах. Результаты расчетов свести в таблицу.

Дано: газ O_2 ; $R=259,8$ Дж/(кг · К); $V_1 = 60$ м³; $p_1 = 0,1$ МПа; $\varepsilon = \frac{V_1}{V_2} = 10$;

$t_1 = 10^\circ\text{C}$; $n = 1,1$.

Решение:

Изотермический процесс: $T_2=T_1=\text{const}$

$$\varepsilon = \frac{V_1}{V_2} \Rightarrow V_2 = \frac{V_1}{\varepsilon} = \frac{60}{10} = 6,0 \text{ м}^3.$$

$$p \cdot V = m \cdot R \cdot T,$$

$$\text{Масса газа: } m = \frac{p_1 \cdot V_1}{R_1 \cdot T_1} = \frac{0,1 \cdot 10^6 \cdot 60}{259,8 \cdot (273 + 10)} = 81,6 \text{ кг}.$$

Удельный объем газа:

$$v_1 = \frac{V_1}{m} = \frac{60}{81,6} = 0,74 \text{ м}^3/\text{кг},$$

$$v_2 = \frac{V_2}{m} = \frac{6,0}{81,6} = 0,074 \text{ м}^3/\text{кг},$$

$$p_2 = \frac{p_1 \cdot v_1}{v_2} = \frac{0,1 \cdot 10^6 \cdot 0,74}{0,074} = 1,0 \cdot 10^6 \text{ Па}.$$

$$T_2 = T_1 = 273 + 10 = 283 \text{ К.}$$

Изменение внутренней энергии: $\Delta U = 0$.

Работа процесса:

$$L = Q = R \cdot m \cdot T \cdot \ln \frac{v_2}{v_1} = 259,8 \cdot 81,6 \cdot 283 \cdot \ln \frac{0,074}{0,74} = -13,81 \cdot 10^6 \text{ Дж.}$$

$$\text{Изменение энтропии: } \Delta S = \frac{Q}{T} = \frac{-13,81 \cdot 10^6}{283} = -48,8 \cdot 10^3 \text{ Дж/К.}$$

Адиабатный процесс: без отвода и подвода теплоты, т.е $Q = 0$.

Теплота: $Q = 0$. Изменение энтропии: $\Delta S = 0$.

Работа совершается за счет внутренней энергии: $L = \Delta U$

Уравнение адиабатного процесса:

$$p_1 \cdot v_1^k = p_2 \cdot v_2^k,$$

где $k = 1,4$ – для двухатомных газов, давление

$$p_2 = p_1 \cdot \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^k = 0,1 \cdot 10^6 \left(\frac{0,74}{0,074} \right)^{1,4} = 2,51 \cdot 10^6 \text{ Па.}$$

Конечную температуру найдем из уравнения: $T_1 \cdot v_1^{k-1} = T_2 \cdot v_2^{k-1}$.

$$T_2 = T_1 \cdot \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1} = 283 \cdot \left(\frac{0,74}{0,074} \right)^{1,4-1} = 710,86 \text{ К.}$$

Удельная работа:

$$l = \frac{R}{k-1} \cdot (T_1 - T_2) = \frac{259,8}{1,4-1} \cdot (283 - 710,86) = -0,288 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг.}$$

Работа процесса: $L = l \cdot m = -0,288 \cdot 10^6 \cdot 81,6 = -23,5 \cdot 10^6 \text{ Дж.}$

Изменение внутренней энергии $\Delta U = -L = 23,5 \cdot 10^6 \text{ Дж}$

Полиτροпный процесс

Показатель политропы $n = 1,1$.

Изохорная теплоемкость процесса $c_v = \frac{R}{k-1} = \frac{259,8}{1,4-1} = 649,5 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$.

Конечную температуру найдем из уравнения:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{n-1}.$$

$$T_2 = T_1 \cdot \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{n-1} = 283 \left(\frac{0,74}{0,074} \right)^{1,1-1} = 356,3 \text{ К.}$$

$$p_1 \cdot v_1^n = p_2 \cdot v_2^n.$$

$$p_2 = p_1 \cdot \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^n = 0,1 \cdot 10^6 \left(\frac{0,74}{0,074} \right)^{1,1} = 1,26 \cdot 10^6 \text{ Па.}$$

$$L = \frac{m \cdot R \cdot (T_1 - T_2)}{n-1} = \frac{81,6 \cdot 259,8(283 - 356,3)}{1,1-1} = -15,54 \cdot 10^6 \text{ Дж.}$$

$$Q = c_v \cdot \frac{n-k}{n-1} \cdot m \cdot (T_2 - T_1) = 649,5 \frac{1,1-1,4}{1,1-1} 81,6(356,3 - 283) = -11,65 \cdot 10^6 \text{ Дж.}$$

$$\Delta U = m \cdot c_v \cdot (T_2 - T_1) = 81,6 \cdot 649,5(356,3 - 283) = 3,88 \cdot 10^6 \text{ Дж}$$

$$\Delta S = m \cdot c_v \cdot \frac{n-k}{n-1} \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} = 81,6 \cdot 649,5 \frac{1,1-1,4}{1,1-1} \ln \frac{356,3}{283} = -36,6 \cdot 10^3 \text{ Дж/К.}$$

Процесс	$m, \text{ кг}$	$T, \text{ К}$	$L, \text{ Дж}$	$Q, \text{ Дж}$	ΔU	$\Delta S, \text{ Дж/кг}$
Изотермический	81,6	283	$-13,81 \cdot 10^6$	$-13,81 \cdot 10^6$	0	$-48,8 \cdot 10^3$
Адиабатный	81,6	710,86	$-23,5 \cdot 10^6$	0	$23,5 \cdot 10^6$	0
Политропный	81,6	356,3	$-15,54 \cdot 10^6$	$-11,65 \cdot 10^6$	$3,88 \cdot 10^6$	$-36,6 \cdot 10^3$

Варианты заданий

	$V_1, \text{ м}^3$	$p_1, \text{ МПа}$	$t_1, \text{ }^\circ\text{C}$	n
1	67	0,101	15	1,03
2	68	0,094	19	1,05
3	61	0,107	6	1,09
4	74	0,111	7,5	1,11
5	66	0,093	20	1,04
6	73	0,099	11	1,01
7	72	0,096	8,5	1,16
8	75	0,103	7	1,08
9	58	0,11	8	1,15
10	62	0,091	12	1,14
11	59	0,109	10,5	1,21
12	69	0,098	16	1,17
13	57	0,095	9,5	1,02
14	63	0,104	9	1,2
15	56	0,102	13	1,19
16	70	0,105	17	1,12
17	64	0,108	10,5	1,06
18	55	0,097	18	1,13
19	71	0,106	5	1,07
20	65	0,102	14	1,18

5. ТЕПЛОТДАЧА

Конвективный теплообмен, теплообмен между поверхностью с температурой t_c и средой с температурой $t_{ж}$, называется теплоотдачей и описывается законом Ньютона–Рихмана:

$$Q = \alpha F (t_c - t_{ж}), \text{ Вт};$$

$$q = \alpha (t_c - t_{ж}), \text{ Вт/м}^2,$$

где $\alpha, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$ – коэффициент теплоотдачи; $F, \text{ м}^2$ – площадь поверхности теплообмена.

Омывающий поверхность теплоноситель (воздух, вода и т.д.) принято называть «жидкостью» и температуру обозначать $t_{ж}$.

Коэффициенты теплоотдачи рассчитываются по уравнениям подобия типа

$$Nu = f(Re, Gr, Pr...),$$

где $Nu = \frac{\alpha \ell}{\lambda}$ – число Нуссельта; $Re = \frac{w \ell}{\nu}$ – число Рейнольдса;

$Gr = \frac{g \beta \vartheta_c \ell^3}{\nu^2}$ – число Грасгофа; $Pr = \frac{\nu}{a}$ – число Прандтля и т.д. – безразмерные комплексы, называемые числами подобия.

Числа подобия включают величины, от которых зависит коэффициент теплоотдачи:

$\lambda, \frac{Вт}{м \cdot К}$ – коэффициент теплопроводности жидкости;

$\nu, \frac{м^2}{с}$ – коэффициент кинематической вязкости жидкости;

$g = 9,8, \frac{м}{с^2}$ – ускорение силы тяжести;

$\omega, \frac{м}{с}$ – скорость жидкости;

$\vartheta_c = t_c - t_{жс}$ – перегрев стенки;

$\ell, м$ – определяющий размер (геометрический размер, в наибольшей степени влияющий на величину коэффициента теплоотдачи);

$\beta = \frac{1}{\nu} \left(\frac{\partial \nu}{\partial T} \right)_p, \frac{1}{К}$ – температурный коэффициент объемного расширения

жидкости.

Для *вертикальной поверхности* (форма поверхности не имеет значения: вертикальная труба или вертикальная пластина) коэффициент теплоотдачи зависит от режима течения в пограничном слое. При *ламинарном режиме* течения жидкости в пограничном слое $[(Gr_{жх} \cdot Pr_{ж}) < 10^9]$ с увеличением координаты x (высоты поверхности) коэффициент теплоотдачи уменьшается, при *переходном режиме* $[10^9 < (Gr_{жх} \cdot Pr_{ж}) < 6 \cdot 10^{10}]$ коэффициент теплоотдачи увеличивается, при *турбулентном режиме* $[(Gr_{жх} \cdot Pr_{ж}) > 6 \cdot 10^{10}]$ коэффициент теплоотдачи остается постоянным.

Средний коэффициент теплоотдачи ($\bar{\alpha}$) для поверхности высотой ℓ с *ламинарным течением* жидкости в пограничном слое $[(Gr_{ж\ell} \cdot Pr_{ж}) < 10^9]$ и $q_c = \text{const}$ рассчитывается по уравнению

$$\bar{Nu}_{ж\ell} = 0,75 (Gr_{ж\ell} \cdot Pr_{ж})^{0,25} \cdot \left(\frac{Pr_{жс}}{Pr_c} \right)^{0,25},$$

где $Nu_{ж\ell} = \frac{\bar{\alpha} \ell}{\lambda}$, $Gr_{ж\ell} = \frac{g \beta \vartheta_c \ell^3}{\nu^2}$.

Индексы в числах подобия \widehat{Gr} или \widehat{Gr} указывают на определяющую температуру $t_{ж}$ или t_c , индекс $\widehat{\ell}$ – на определяющий размер: длину вертикальной поверхности ℓ .

Постоянный коэффициент теплоотдачи при **турбулентном течении** в пограничном слое [$(Gr_{жх} \cdot Pr_{ж}) > 6 \cdot 10^{10}$] рассчитывается по уравнению

$$Nu_{жх} = 0,15 (Gr_{жх} \cdot Pr_{ж})^{1/3} \cdot \left(\frac{Pr_{жс}}{Pr_c} \right)^{0,25}.$$

В уравнении последнем определяющим размером является любая координата x , на которой имеет место турбулентное течение жидкости в пограничном слое. Анализ этого уравнения дает, что α не зависит от x .

Коэффициент ε_k характеризует влияние конвекции на перенос теплоты. При $(Gr_{ж\delta} \cdot Pr_{ж}) < 10^3$ коэффициент ε_k принимают равным 1, при $(Gr_{ж\delta} \cdot Pr_{ж}) > 10^3$ рассчитывают по формуле

$$\varepsilon_k = 0,18 (Gr_{ж\delta} \cdot Pr_{ж})^{0,25},$$

где $Gr_{ж\delta} = \frac{g\beta(t_1 - t_2)\delta^3}{\nu^2}$.

Для *плоской прослойки воздуха* передача тепла излучением между поверхностями с температурами t_1 и t_2 рассчитывается по уравнению

$$q_l = \varepsilon_{np} C_0 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right], \text{ Вт/м}^2,$$

где $\varepsilon_{np} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}$ – приведенная степень черноты; $C_0 = 5,67 \text{ Вт/м}^2\text{К}^4$ – коэф-

фициент излучения абсолютно черного тела; $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – степени черноты поверхностей.

Задача 5. Пример решения

Рассчитать теплоотдачу q , Вт/м² с 1 м² нагретой вертикальной поверхности высотой $\ell = 3$ м с температурой $t_c = 60^\circ\text{C}$ в окружающую среду (к спокойному воздуху) с $t_{ж} = 20^\circ\text{C}$. Степень черноты поверхности $\varepsilon_c = 0,9$.

Решение:

Теплота от поверхности к воздуху передается путем конвективного теплообмена и излучения

$$\begin{aligned} q &= q_k + q_l, \\ q_k &= \alpha(t_c - t_{ж}), \\ q_l &= C_0 \varepsilon_c \left[\left(\frac{T_c}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{жс}}{100} \right)^4 \right]. \end{aligned}$$

Решение задачи сводится к расчету среднего коэффициента теплоотдачи при естественной конвекции воздуха около вертикальной поверхности.

Порядок расчета α следующий:

Определяют режим течения в пограничном слое при $x = \ell$. Для этого из таблицы физических свойств сухого воздуха («Теплопередача» Исаченко, Осипова, Сукомел) выбирают необходимые для расчета величины:

$$\text{при } t_{ж} = 20^{\circ}\text{C } \lambda = 2,59 \cdot 10^{-2} \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}, \nu = 15,06 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}, Pr_{ж} = 0,703,$$

$$\text{при } t_c = 60^{\circ}\text{C } Pr_c = 0,696,$$

и рассчитывают

$$(Gr_{ж\ell} \cdot Pr_{ж}) = \frac{g\beta(t_c - t_{ж})\ell^3}{\nu^2} \cdot Pr_{ж} = \frac{9,8 \cdot \frac{1}{293} (60 - 20) \cdot 3^3}{(15,06 \cdot 10^{-6})^2} \cdot 0,703 = 1,12 \cdot 10^{11}.$$

Так как $(Gr_{ж\ell} \cdot Pr_{ж}) > 6 \cdot 10^{10}$, средний коэффициент теплоотдачи α рассчитывается по формуле $Nu_{жx} = 0,15 (Gr_{жx} \cdot Pr_{ж})^{1/3} \cdot \left(\frac{Pr_{ж}}{Pr_c}\right)^{0,25}$.

При $x = \ell$

$$Nu_{ж\ell} = 0,15 (Gr_{ж\ell} \cdot Pr_{ж})^{1/3} \cdot \left(\frac{Pr_{ж}}{Pr_c}\right)^{0,25} = 0,15 \cdot (1,12 \cdot 10^{11})^{1/3} \cdot \left(\frac{0,703}{0,696}\right)^{0,25} = 724,9,$$

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{\ell} = \frac{724,9 \cdot 2,59 \cdot 10^{-2}}{3} = 6,26 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}.$$

Рассчитывают конвективную теплоотдачу

$$q_{к} = 6,26(60 - 20) = 250,4 \text{ Вт/м}^2,$$

лучистую теплоотдачу

$$q_{л} = 5,67 \cdot 0,9 \left[\left(\frac{333}{100}\right)^4 - \left(\frac{293}{100}\right)^4 \right] = 251,4 \text{ Вт/м}^2,$$

суммарную теплоотдачу с 1 м² поверхности

$$q = 250,4 + 251,4 = 501,8 \text{ Вт/м}^2.$$

Варианты заданий

	$l, \text{м}$	$t_c, ^{\circ}\text{C}$	$t_{ж}, ^{\circ}\text{C}$
1	2,9	41	11
2	2,0	52	16
3	3,4	54	22
4	2,4	49	15
5	3,7	64	28
6	3,6	70	21
7	3,5	43	27
8	2,5	74	19

	$l, \text{м}$	$t_c, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{жс}}, ^\circ\text{C}$
9	3,8	62	26
10	2,2	69	13
11	3,1	50	29
12	2,6	45	14
13	3,9	72	25
14	2,3	56	17
15	3,2	59	23
16	2,7	58	18
17	4,0	68	31
18	3,3	48	24
19	2,8	66	30
20	2,1	47	12

6. СЛОЖНЫЙ ТЕПЛООБМЕН. ТЕПЛОПЕРЕДАЧА ЧЕРЕЗ ПЛОСКУЮ СТЕНКУ

Теплопередача представляет собой сложный теплообмен, при котором тепловой поток от одной жидкости (или газа) передается через стенку.

Расчетные уравнения теплопередачи зависят от *формы стенки*, разделяющей теплоносители.

Рассмотри теплопередачу *через плоскую однослойную стенку* толщиной δ и коэффициентом теплопроводности λ .

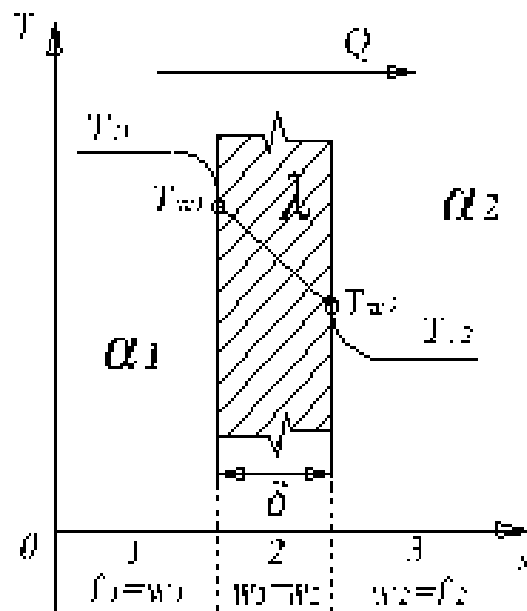


Рис. 3. Теплопередача через плоскую стенку: α_1 – коэффициент теплоотдачи от нагретой среды к стенке; α_2 – коэффициент теплоотдачи от стенки к холодной среде; $T_{f,1}$ – температура нагретой среды; $T_{f,2}$ – температура холодной среды

В результате решения поставленной задачи необходимо найти и плотность теплового потока q и, при заданной площади поверхности теплообмена F , тепловой поток Q , а также температуры на поверхностях стенки $T_{w,1}$ и $T_{w,2}$.

Плотность теплового потока q :

$$q = \frac{T_{f1} - T_{f2}}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} = k \cdot (T_{f1} - T_{f2}) = \frac{T_{f1} - T_{f2}}{R_t},$$

где $k = \frac{1}{R_t}$ коэффициент теплопередачи через плоскую стенку, $Вт/(м^2 \cdot град)$; R_t – термическое сопротивление теплопередачи через плоскую стенку, $(м^2 \cdot град)/Вт$.

Термическое сопротивление теплопередачи через плоскую стенку равно сумме термического сопротивления теплоотдачи от горячего флюида к стенке ($R_{t,1} = 1/\alpha_1$), термического сопротивления теплопроводности плоской стенки ($R_{t,2} = \delta/\lambda$) и термического сопротивления теплоотдачи от стенки к холодному теплоносителю ($R_{t,3} = 1/\alpha_2$).

Температуру $T_{w,1}$ можно найти двумя способами, поскольку по условию задачи заданы две температуры:

а) на участке ($f_1 - w_1$)

$$q = \frac{T_{f,1} - T_{w,1}}{R_{t,1}} \Rightarrow T_{w,1} = T_{f,1} - q \cdot R_{t,1},$$

б) на участке ($w_1 - f_2$)

$$q = \frac{T_{w,1} - T_{f,2}}{R_{t,2} + R_{t,3}} \Rightarrow T_{w,1} = T_{f,2} + q \cdot (R_{t,2} + R_{t,3}).$$

Для расчета **температуры $T_{w,2}$** можно воспользоваться уже тремя формулами, поскольку в данном случае мы знаем уже три температуры $T_{f,1}$, $T_{w,1}$ и $T_{f,2}$:

а) на участке ($f_1 - w_2$) $q = \frac{T_{f,1} - T_{w,2}}{R_{t,1} + R_{t,2}} \Rightarrow T_{w,2} = T_{f,1} - q \cdot (R_{t,1} + R_{t,2});$

б) на участке ($w_1 - w_2$) $q = \frac{T_{w,1} - T_{w,2}}{R_{t,2}} \Rightarrow T_{w,2} = T_{w,1} - q \cdot R_{t,2};$

в) на участке ($w_2 - f_2$) $q = \frac{T_{w,2} - T_{f,2}}{R_{t,3}} \Rightarrow T_{w,2} = T_{f,2} + q \cdot R_{t,3}.$

Для стенки, состоящей из n слоев, формула расчета теплопередачи через плоскую стенку имеет вид:

$$q = \frac{T_{f,1} - T_{f,2}}{1/\alpha_1 + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + 1/\alpha_2},$$

где δ_i и λ_i – толщина и коэффициент теплопроводности i -го слоя стенки.

Задача 6. Пример решения

Определить плотность теплового потока и рассчитать поле температур в плоской трехслойной стенке, состоящей из слоя штукатурки толщиной $\delta_{ш} = 5$ см, кирпича толщиной $\delta_{к} = 24$ см и дерева толщиной $\delta_{д} = 5$ см, если температура наружной поверхности штукатурки $t_{c1} = -20^\circ\text{C}$, а внутренней поверхности дерева $t_{c2} = +20^\circ\text{C}$. Принять $\lambda_{ш} = 0,78$ Вт/м $^\circ\text{C}$, $\lambda_{к} = 0,25$ Вт/м $^\circ\text{C}$, $\lambda_{д} = 0,1$ Вт/м $^\circ\text{C}$. Построить график изменения температур в стенке (рис. 4).

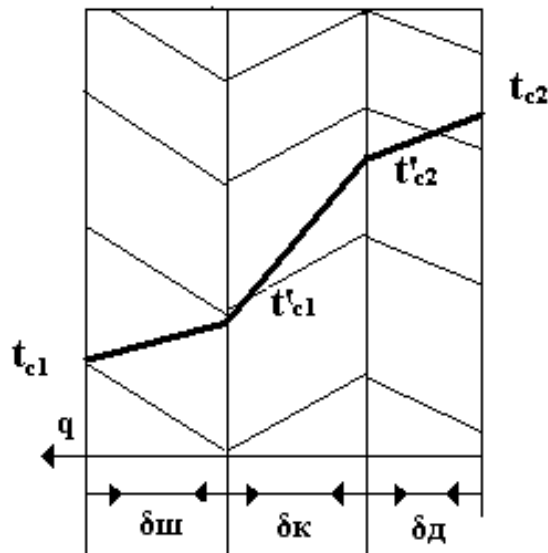


Рис. 4

Решение:

$$q = (t_{c2} - t_{c1}) / (\delta_{ш}/\lambda_{ш} + \delta_{к}/\lambda_{к} + \delta_{д}/\lambda_{д}) = (20 + 20) / (0,05/0,78 + 0,24/0,25 + 0,05/0,1) = 40 / (0,06410 + 0,96 + 0,5) = 40 / 1,5241 = 26,245 \text{ Вт/м}^2.$$

Определим t'_{c2} из уравнения:

$$q = (\lambda_{д}/\delta_{д}) / (t_{c2} - t'_{c2}).$$

То есть

$$t'_{c2} = t_{c2} - (q \delta_{д}) / \lambda_{д} = 20 - (26,245 * 0,05) / 0,1 = 20 - 13,1225 = 6,9^\circ\text{C}.$$

Из уравнения

$$q = (\lambda_{к}/\delta_{к}) / (t'_{c2} - t'_{c1})$$

определим

$$t'_{c1} = t'_{c2} - (q \delta_{к}) / \lambda_{к} = 6,9 - (26,245 * 0,24) / 0,25 = 6,9 - 25,2 = -18,2^\circ\text{C}.$$

График изменения температуры в трехслойной стенке показан на рис. 5.

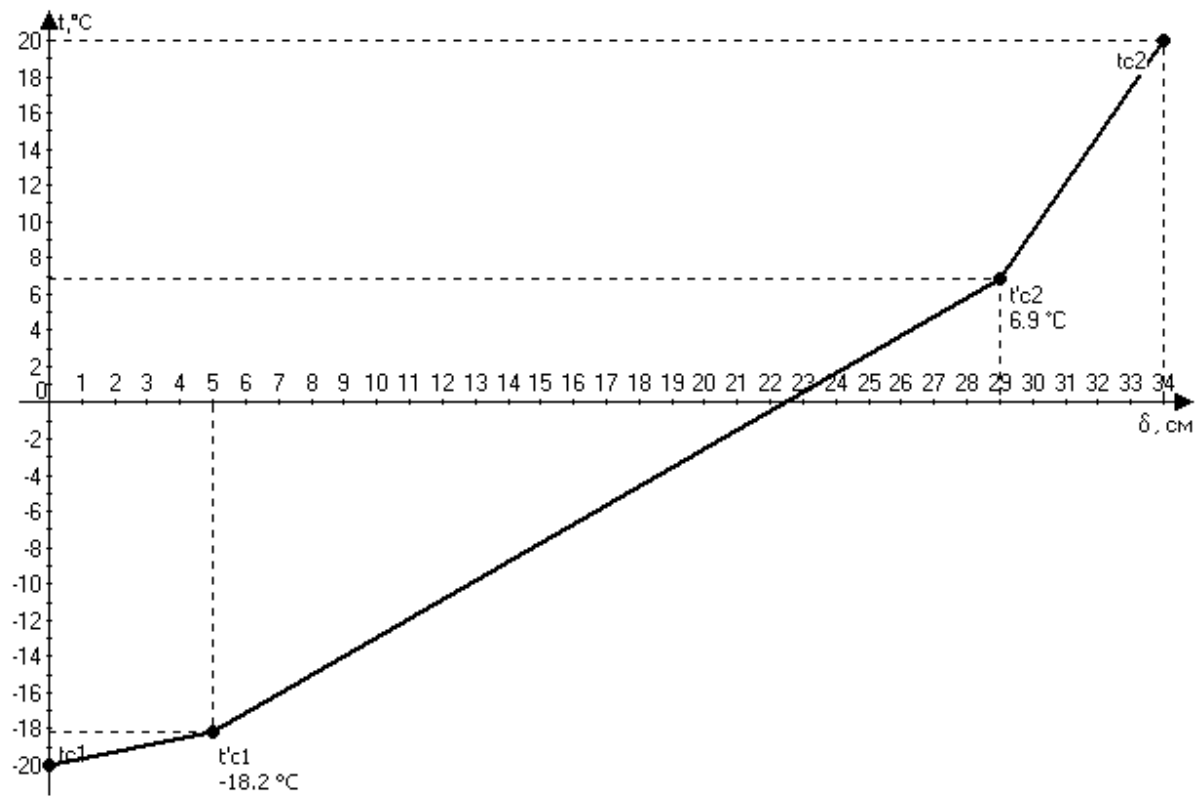


Рис. 5

Варианты заданий

	$\delta_{ш}$	$\delta_{к}$	$\delta_{д}$	t_{c1}	t_{c2}
1	6,5	23	6,5	-22	+20
2	6	15	6	-25	+24
3	5	25	6	-14	+18
4	4	30	5	-21	+21
5	7	17	7	-22	+22
6	3,5	22	5,5	-10	+15
7	7,5	29	7,5	-11	+17
8	7	33	5	-16	+21
9	8	18	8	-23	+23
10	4	31	3	-24	+24
11	3	27	5	-21	+23
12	5,5	16	5,5	-25	+25
13	4	21	4	-26	+10
14	4,5	26	4,5	-18	+14
15	3	20	3	-23	+19
16	6	32	4	-17	+19
17	3,5	28	3,5	-15	+15
18	2	19	2	-18	+17
19	2,5	34	2,5	-17	+17
20	5	35	5	-19	+19

7. ТЕПЛОПЕРЕДАЧА. ТЕПЛООБМЕННЫЙ АППАРАТ

Теплообменный аппарат (теплообменник) – это устройство, предназначенное для нагрева, охлаждения или изменения агрегатного состояния теплоносителя.

Чаще всего в теплообменных аппаратах осуществляется передача теплоты от одного теплоносителя к другому, т.е. нагревание одного теплоносителя происходит за счет охлаждения другого.

Теплообменники с двумя теплоносителями по принципу действия подразделяются на три основные группы:

- рекуперативные (рис. 6);
- регенеративные;
- смешительные.

Рекуперативные аппараты получили особенно широкое развитие во всех областях техники в которых теплота от горячей к холодной жидкости передается через *разделительную стенку*.

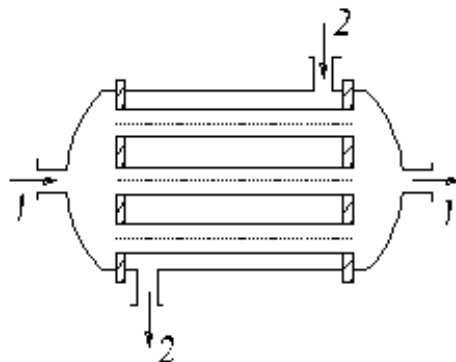


Схема простейшего кожухотрубчатого рекуперативного теплообменника для передачи теплоты от теплоносителя 1 теплоносителю 2

Рис. 6

Стенка, которая омывается с обеих сторон теплоносителями, называется **рабочей поверхностью теплообменника**. Она выполняется из материала с хорошей теплопроводностью (меди, стали, латуни).

Задача 7. Пример решения

Определить площадь поверхности нагрева газовой водяного рекуперативного теплообменника, работающего по противоточной схеме (рис. 7). Греющий теплоноситель – дымовые газы с начальной температурой t'_r и конечной t''_r . Расход воды через теплообменник G_b , начальная температура воды t'_g , конечная t''_g . Коэффициент теплоотдачи от газов к стенке трубы α_r и от стенки трубы к воде α_b . Теплообменник выполнен из стальных труб с наружным диаметром $d = 50\text{мм}$ и толщиной стенки $\delta = 4\text{мм}$.

Коэффициент теплопроводности стали $\lambda = 62 \text{ Вт/(м*К)}$. Стенку считать чистой с обеих сторон.

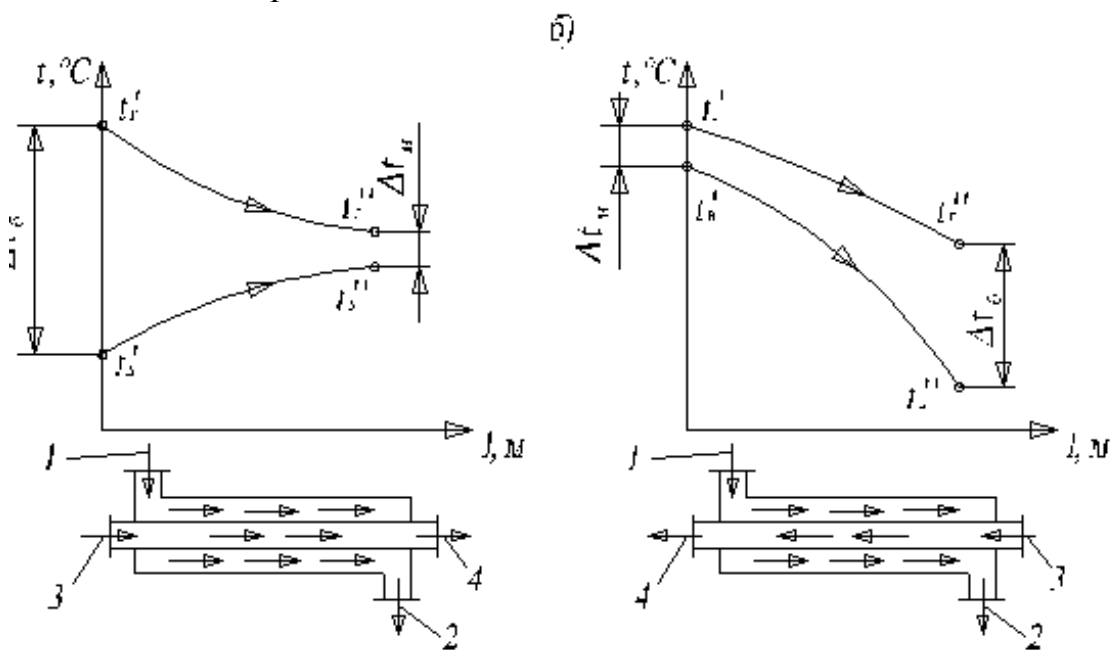


Рис. 7

Дано: $G_B = 3,6 \text{ кг/с}$, $t_B' = 30^\circ\text{C}$, $t_B'' = 165^\circ\text{C}$, $t_r' = 390^\circ\text{C}$, $t_r'' = 200^\circ\text{C}$,
 $\alpha_r = 50 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$, $\alpha_B = 5600 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$.

Решение:

Коэффициент теплопередачи K – величина обратная полному термическому сопротивлению. K численно равен тепловому потоку от единственной поверхности теплообмена при разности температур в 1°К .

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_r} + \frac{\delta}{\lambda_{ст}} + \frac{1}{\alpha_B}}; \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\cdot\text{К}}$$

Площадь теплообменника

$$F = \frac{Q \cdot 10^3}{k \cdot \Delta t_{cp}} \cdot \text{м}^2,$$

где Δt_{cp} – средний температурный напор.

Уравнение теплового баланса

$$Q = M_1 C_1 (t_r' - t_r'') \cdot \eta_n = M_2 C_2 (t_B'' - t_B'),$$

где M_1, M_2 – массовые расходы греющего и нагреваемого теплоносителей;
 C_1, C_2 – массовые теплоемкости теплоносителей $\left(C_2 = 4,19 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \right)$; η_n – поверхностный КПД теплообменника (у батарей равен 1);

$$Q = 4,19 \cdot G_g \cdot (t_B'' - t_B'); \\ Q = 4,19 \cdot 3,6(165 - 30) = 2036 \text{ кВт};$$

$$K = \frac{1}{\frac{1}{50} + \frac{0,004}{62} + \frac{1}{5600}} = 49,5;$$

$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_{\delta} - \Delta t_{\mathcal{M}}}{\ln \frac{\Delta t_{\delta}}{\Delta t_{\mathcal{M}}}},$$

где Δt_{δ} – наибольшая разность температур между теплоносителями;
 $\Delta t_{\mathcal{M}}$ – наименьшая разность температур между теплоносителями.

Определяем средний температурный напор при:

– прямотоке:

$$\Delta t_{cp} = \frac{(t_r' - t_b') - (t_r'' - t_b'')}{\ln \frac{t_r' - t_b'}{t_r'' - t_b''}} = \frac{(390 - 30) - (200 - 165)}{\ln \frac{390 - 30}{200 - 165}} = \frac{325}{2,3} = 141^{\circ} \text{C},$$

– противотоке:

$$\Delta t_{cp} = \frac{(t_r' - t_b'') - (t_r'' - t_b')}{\ln \frac{t_r' - t_b''}{t_r'' - t_b'}} = \frac{(390 - 165) - (200 - 30)}{\ln \frac{390 - 165}{200 - 30}} = \frac{55}{0,28} = 196^{\circ} \text{C}.$$

Определяем площадь теплообменника

$$\text{Прямоток: } F = \frac{Q \cdot 10^3}{K \cdot \Delta t_{cp \text{ прямоток}}} = \frac{2036 \cdot 10^3}{49,5 \cdot 141} = 292 \text{ м}^2.$$

$$\text{Противоток: } F = \frac{Q \cdot 10^3}{K \cdot \Delta t_{cp \text{ противоток}}} = \frac{2036 \cdot 10^3}{49,5 \cdot 196} = 210 \text{ м}^2.$$

В расчетах мы убеждаемся в том, что выгоднее противоточное направление теплоносителей, т.к. для теплообменника требуется меньшая площадь.

Варианты заданий

	Gв, кг/с	$t_B', ^{\circ}\text{C}$	$t_B'', ^{\circ}\text{C}$	$t_r', ^{\circ}\text{C}$	$t_r'', ^{\circ}\text{C}$	$\alpha_{\Gamma}, \text{Вт/м}^2 \cdot \text{К}$	$\alpha_B, \text{Вт/м}^2 \cdot \text{К}$
1	4,6	35	170	395	205	41	5550
2	3,7	27	200	390	225	52	5500
3	4,7	28	190	388	207	58	5610
4	3,5	33	205	430	188	46	5620
5	4,4	53	203	445	212	57	5660
6	3,4	37	177	450	210	53	5670
7	4,5	51	188	414	180	47	5510
8	3,8	55	171	375	208	48	5600
9	4,3	31	180	402	185	60	5570
10	3,3	48	183	381	215	45	5640

	Gв, кг/с	$t'_B, ^\circ\text{C}$	$t''_B, ^\circ\text{C}$	$t'_r, ^\circ\text{C}$	$t''_r, ^\circ\text{C}$	$\alpha_\Gamma, \text{Вт/м}^2\cdot\text{К}$	$\alpha_B, \text{Вт/м}^2\cdot\text{К}$
11	3,9	26	179	392	190	54	5680
12	3,2	25	197	400	193	56	5630
13	4,0	39	185	420	200	59	5580
14	3,1	28	173	380	214	42	5520
15	4,8	30	202	383	209	44	5590
16	4,1	33	215	404	195	55	5650
17	3,0	45	220	427	217	49	5530
18	4,2	41	174	438	230	43	5690
19	4,9	42	218	434	192	51	5660
20	5,0	34	175	410	227	50	5540

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СНиП П-3-79*. Строительная теплотехника. Нормы проектирования. – М.: ЦИТП. 1998. – 32 с.
2. Кириченко П.А. Термодинамика, статистическая и молекулярная физика: учеб. пособие / П.А. Кириченко – 3-е изд. – М.: Физматкнига, 2005. – 176 с.
3. Коротков П.Ф. Молекулярная физика и термодинамика. Основные положения и решения задач: учеб. пособие. / П.Ф. Коротков. 2-е изд.– М.: МФТИ, 2004. – 168 с.
4. Цветков Ф.Ф. Тепломассообмен: учеб. пособие для вузов / Ф.Ф. Цветков, Б.А. Григорьев – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Издательство МЭИ, 2005. – 550 с.
5. Соколов Б.А. Котельные установки и их эксплуатация: учебник / Б.А. Соколов. 2-е изд., испр. М.: Издательский центр «Академия», 2007. – 432 с.
6. Исаченко В.П. Теплопередача / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел – М.: Энергия, 1975. – 488 с.
7. Гурина В.Н. Методические указания к самостоятельной работе и курсовому проектированию «Теплотехнические расчеты» / В.Н. Гурина, И.Б. Ревва. Томск, Изд. ТПУ, 2009, 44 с.
8. Московский С.Б. Курс статистической физики и термодинамики: учебник для вузов / С.Б. Московский – М.: Академический проект: Фонд «Мир», 2005. – 320 с.
9. Александров А.А. Термодинамические основы циклов теплоэнергетических установок / А.А. Александров – М.: Издательство МЭИ, 2004.
10. Бойко Е.А. Котельные установки и парогенераторы (тепловой расчет парового котла): учеб. пособие / Е.А. Бойко, И.С. Деринг, Т.П. Охорзина. Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2005. – 96 с.