



«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Кафедра теплотехники и теплоэнергетики

Утверждаю
Заведующий кафедрой
профессор В.А. Лебедев
«__» сентября 2018 г.

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ
для проведения практических занятий по учебной дисциплине

«ТЕРМОДИНАМИКА И ТЕПЛОПЕРЕДАЧА»

Специальность (направление подготовки):	21.03.01 Нефтегазовое дело
Специализация (профиль):	Разработка и эксплуатация углеводородных месторождений шельфа; Эксплуатация и обслуживание объектов добычи нефти; Эксплуатация и обслуживание объектов добычи газа, газоконденсата и подземных хранилищ; Эксплуатация сетей газораспределения и газопотребления; Сооружение и ремонт объектов систем трубопроводного транспорта; Эксплуатация и обслуживание объектов транспорта и хранения нефти, газа и продуктов переработки; Бурение нефтяных и газовых скважин; Бурение нефтяных и газовых скважин на шельфе

Разработал: *доцент Андреев В.В.*

*Обсуждены и одобрены на заседании кафедры
Протокол № 10 от 19 сентября 2018 г.*

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2018

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

Кафедра теплотехники и теплоэнергетики

ТЕРМОДИНАМИКА И ТЕПЛОПЕРЕДАЧА

*Методические указания к практическим занятиям
для студентов*

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2018

ТЕРМОДИНАМИКА И ТЕПЛОПЕРЕДАЧА: Методические указания к практическим занятиям / Санкт-Петербургский горный университет. Сост. Андреев В.В., СПб, 2018. 48 с.

Методические указания предназначены для подготовки и выполнения студентами практических заданий. Содержат необходимые сведения и порядок выполнения типовых практических заданий, а также сами задания на практические занятия.

Предназначены для студентов дневной формы обучения.

Табл. 23. Ил. 9. Библиогр.: 6 назв.

Научный редактор проф. Лебедев В.А.

ВВЕДЕНИЕ

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

Задачей практических занятий является ознакомление студентом с частными вопросами разного характера в области теплотехники, как базовой науки для изучения и расчета тепловых машин и теплоэнергетического оборудования предприятий.

Методические указания к выполнению практических занятий

Выбирается вариант задания с исходными числовыми данными. Переписывается условие задания полностью с выбранными числовыми данными.

Производится расчет с указанием формул и расшифровкой входящих в них обозначений и указаний единиц международной системы (СИ).

По необходимости расчеты дополняются краткими пояснениями и выводами.

Практические занятия выполняются в отдельной тетради с указанием на титульном листе фамилии, инициалов, шифра студента, а также факультета и специальности.

Практическое занятие № 1 Определение параметров смеси идеальных газов

Методические указания.

Смесь количественно может быть задана в массовых γ_i и объемных r_i долях. Связь между γ_i и r_i выражается при помощи следующих формул:

$$\gamma_i = \frac{r_i \mu_i}{\sum_{i=1}^n (r_i \mu_i)}, r_i = \frac{\gamma_i}{\sum_{i=1}^n \frac{\gamma_i}{\mu_i}}. \quad (1.1)$$

В смеси, находящейся в термодинамическом равновесии, температура всего объема $V_{см}$ одинакова, обозначим ее $T_{см}$. Если все компоненты газовой смеси соответствуют определению идеального

газа, то термодинамическое состояние этой смеси описывается уравнением Клапейрона-Менделеева:

$$p_{см} V_{см} = m_{см} R_{см} T_{см}. \quad (1.2)$$

В зависимости от того, как задана смесь, удельную теплоемкость смеси можно рассчитывать при помощи следующих формул:

смесь задана массовыми долями γ_i :

- $c_{vсм} = \sum_{i=1}^n \gamma_i c_{vi}$ — изохорная массовая удельная теплоемкость смеси;
- $c_{pсм} = \sum_{i=1}^n \gamma_i c_{pi}$ — изобарная массовая удельная теплоемкость смеси;

смесь задана в объемных долях r_i :

- $c'_{vсм} = \sum_{i=1}^n r_i c'_{vi}$ — изохорная объемная удельная теплоемкость смеси;
- $c'_{pсм} = \sum_{i=1}^n r_i c'_{pi}$ — изобарная объемная удельная теплоемкость смеси;

где c_{vi} , c_{pi} , и c'_{vi} , c'_{pi} — массовые изохорная, изобарная и объемные изохорная, изобарная теплоемкости i -го компонента смеси.

Для выполнения задания сначала следует схематично представить рассматриваемый процесс в p - v - и T - s - диаграммах, это позволит правильно выбрать теоретические формулы для расчета параметров смеси.

Например, если газовая смесь из состояния 1 переходит в состояние 2 по адиабате, то применительно ко всему объему $V_i = m_{см} \cdot v_i$ эти уравнения принимают вид

$$p_1 \cdot V_1^k = p_2 \cdot V_2^k; T_1 \cdot V_1^{k-1} = T_2 \cdot V_2^{k-1}; T_1^k \cdot p_1^{k-1} = T_2^k \cdot p_2^{k-1}.$$

Очевидно, что прежде необходимо найти показатель адиабаты $k = \frac{c_{pсм}}{c_{vсм}}$, для нахождения значения которого нужно рассчитать изобарную $c_{pсм}$ и изохорную $c_{vсм}$ теплоемкости смеси, используя приведенные выше формулы.

Из приложения [П.1] находятся значения мольных изобарных и изохорных теплоемкостей компонентов газовой смеси μc_{pi} , μc_{vi} .

Перевести значения мольных теплоемкостей в массовые можно с помощью формул:

$$c_{pi} = \frac{\mu c_{pi}}{\mu_i}; c_{vi} = \frac{\mu c_{vi}}{\mu_i}.$$

Запишем формулу (1.1) применительно к начальному состоянию смеси: $p_1 V_1 = m_{см} \cdot R_{см} \cdot T_1$.

Из последнего выражения находим начальное давление:

$$p_1 = \frac{m_{см} R_{см} T_1}{V_1}.$$

Далее в соответствии с теоретическими формулами можно найти конечные параметры смеси V_2 и T_2 , а также удельную работу в процессе 1-2. Например, для адиабатного процесса:

$$l_{1-2} = \frac{R_{см}(T_1 - T_2)}{k - 1}.$$

Применительно ко всей массе смеси работа сжатия равна

$$L_{1-2} = m_{см} l_{см}.$$

Изменение удельной внутренней энергии смеси определяется по формуле:

$$\Delta u = (u_2 - u_1) = c_v \cdot (T_2 - T_1).$$

Применительно ко всей массе смеси изменение внутренней энергии равно

$$\Delta U = U_2 - U_1 = m_{см} \cdot (u_2 - u_1) = m_{см} \cdot c_v \cdot (T_2 - T_1).$$

Определяем парциальные давления компонентов газовой смеси. Из закона Бойля - Мариотта следует

$$p_i V_{см} = p_{см} V_i; p_i = p_{см} \left(\frac{V_i}{V_{см}} \right) = p_{см} r_i.$$

Используя последнее выражение, определяем парциальные давления компонентов газовой смеси:

$$p_i = r_i p_2.$$

Очевидно, что $p_{см} = p_1 + p_2 + \dots + p_n = \sum p_i$ - давление смеси (закон Дальтона).

Задание 1.1

Смесь идеальных газов задана объемными долями: r_{CO_2} ; r_{N_2} ; r_{O_2} . Общая масса смеси $m_{см} = 20$ кг. В начальном состоянии объем

смеси $V_1=15 \text{ м}^3$ и температура t_1 . В результате адиабатного сжатия давление смеси увеличивается до p_2 .

Определить давление смеси p_1 в начальном состоянии, температуру t_2 и объем V_2 смеси в конечном состоянии, работу сжатия L_{1-2} и изменение внутренней энергии ΔU . Считать, что теплоемкость газов не зависит от температуры и определяется из приложения [П.1].

Определить парциальные давления газов, входящих в смесь, в конечном состоянии. Изобразить процесс в pV - и Ts - диаграммах.

Исходные данные для расчетов выбрать в таблице 1.1 по последней и предпоследней цифре шифра.

Таблица 1.1

Последняя цифра шифра	Объемный состав смеси, %			Предпоследняя цифра шифра	p_2 , МПа	t_1 , °С
	CO ₂	O ₂	N ₂			
9	60	10	30	9	0,9	53
8	55	15	30	8	0,8	52
7	50	20	30	7	0,7	51
6	45	25	30	6	1,0	43
5	40	30	30	5	1,1	44
4	35	35	30	4	1,2	45
3	30	40	30	3	1,5	46
2	25	45	30	2	1,3	47
1	20	50	30	1	1,4	48
0	15	55	30	0	1,6	49

Задание 1.2

Определить мольную массу, массовый состав, удельный объем и плотность, газовую постоянную, а также парциальные давления компонентов газовой смеси, температура которой t и давление p , если объемный состав смеси τ задан в процентах. Данные, необходимые для решения задачи, выбрать из табл. 1.2, по двум последним цифрам шифра.

Таблица 1.2

Последняя цифра шифра	Объемный состав смеси, %			Предпоследняя цифра шифра	p , МПа	t , °С
	CO ₂	O ₂	N ₂			
9	12	7	81	9	0,15	530
8	12	10	78	8	0,14	520
7	13	8	79	7	0,13	510
6	12	8	80	6	0,12	430
5	10	10	80	5	0,11	440

4	11	8	81	4	0,10	450
3	12	9	79	3	0,15	460
2	15	6	79	2	0,12	470
1	14	6	80	1	0,13	480
0	13	7	80	0	0,16	490

Задание 1.3

По известному массовому составу продуктов сгорания определить: мольную массу, газовую постоянную, плотность и удельный объем продуктов сгорания при нормальных условиях; средние массовые и объемные теплоемкости при постоянном давлении в пределах температур от 0°C до t_1 и от 0°C до t_2 и количество теплоты, отданное 1 кг газов при изобарном охлаждении от t_1 до $t_2^{\circ}\text{C}$.

Состав газовой смеси и другие данные, необходимые для решения задачи, выбрать из табл. 1.3, по двум последним цифрам шифра. Таблицы теплоемкостей газов приведены в приложениях [П.2, П.3].

Таблица 1.3

Последняя цифра шифра	Массовый состав смеси, %					Предпоследняя цифра шифра	$t_1, ^{\circ}\text{C}$	$t_2, ^{\circ}\text{C}$
	CO_2	H_2O	N_2	O_2	CO			
9	20,0	8,0	72,0	-	-	9	300	180
8	15,5	8,9	71,4	-	4,2	8	350	160
7	9,9	10,0	70,7	-	9,4	7	400	170
6	2,9	11,3	69,9	-	15,9	6	250	150
5	18,0	7,2	72,8	2	-	5	150	180
4	16,0	6,4	73,6	4	-	4	300	140
3	14,0	5,6	74,7	6	-	3	350	120
2	12,0	4,8	77,2	8	-	2	400	165
1	14,5	15,0	66,6	-	3,9	1	450	160
0	18,8	13,6	67,6	-	-	0	250	130

Практическое занятие № 2 Расчет термодинамических функций

Методические указания.

При анализе каждого из изопараметрических процессов необходимо определить значения показателя политропы, теплоемкости процесса и изменения функций состояния, а также величину теплоты, принимающей участие в данном процессе, и

работу расширения, совершаемый ТДС при протекании рассматриваемого процесса.

1. Изохорный процесс $v = \text{const}$, $dv = 0$. В уравнении линии процесса $pv^n = \text{const}$, ($p^{1/n}v = \text{const}$) условие $v = \text{const}$ удовлетворяется при $n = \infty$, а теплоемкость изохорного процесса (рис.2.1) $c = c_v \frac{n-k}{n-1}$.

Из уравнения состояния идеального газа (при $v = \text{const}$) следует

$$\frac{p}{T} = \frac{R_\Gamma}{v} = \text{const} \Rightarrow \frac{p}{T} = \frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2} \Rightarrow p_1 T_2 = p_2 T_1.$$

Перечень величин, представленных в выражении в изохорном процессе, взаимосвязан следующими соотношениями:

$$p_1 T_2 = p_2 T_1;$$

$$\int_1^2 \delta l = \int_{v_1}^{v_2} p dv = 0 \Rightarrow l_{1-2} = 0, v_1 = v_2;$$

$$\int_1^2 \delta q = \int_{u_1}^{u_2} du + \int_{v_1}^{v_2} p dv = \int_{u_1}^{u_2} du \Rightarrow q_{1-2} = u_2 - u_1;$$

$$\int_{u_1}^{u_2} du = \int_{T_1}^{T_2} c_v dT \Rightarrow \Delta u = u_2 - u_1 = c_v(T_2 - T_1);$$

$$\int_{h_1}^{h_2} dh = \int_{T_1}^{T_2} c_p dT \Rightarrow \Delta h = h_2 - h_1 = c_p(T_2 - T_1);$$

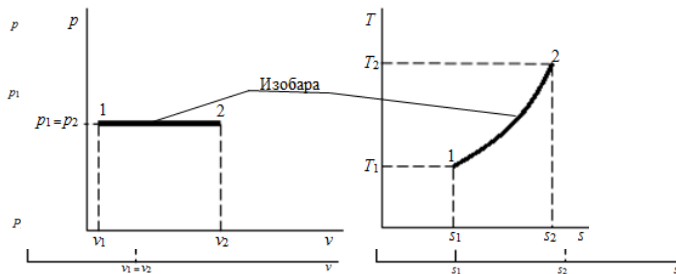


Рис. 1.3. p - v -, T - s -диаграммы изохорного процесса.

$$\int_{s_1}^{s_2} ds = \int \frac{du + pdv}{T} = \int_{T_1}^{T_2} \frac{c_v dT}{T} \Rightarrow \Delta s = s_2 - s_1 = c_v \ln \frac{T_2}{T_1};$$

$$T_2 = T_1 \exp\left(\frac{s_2 - s_1}{c_v}\right).$$

2. Изобарный процесс $p = \text{const}$, $dp = 0$. В уравнении политропного процесса $pv^n = \text{const}$, условие $p = \text{const}$

удовлетворяется при $n=0$; теплоемкость изобарного процесса (рис. 2.2) $c = c_v \frac{n-k}{n-1} = c_p$.

Из уравнения состояния (при $p=\text{const}$) следует $\frac{v}{T} = \frac{R_r}{p} = \text{const}$,
 $\frac{v}{T} = \frac{v_1}{T_1} = \frac{v_2}{T_2} \Rightarrow v_1 T_2 = v_2 T_1$.

Соотношения между величинами определяются путем интегрирования соответствующих выражений, как это производилось при рассмотрении изохорного процесса, имеют окончательный вид:

$$v_1 T_2 = v_2 T_1;$$

$$q_{1-2} = h_2 - h_1;$$

$$l_{1-2} = p_1(v_2 - v_1) = p_2(v_2 - v_1);$$

$$\Delta u = u_2 - u_1 = c_v(T_2 - T_1);$$

$$\Delta h = h_2 - h_1 = c_p(T_2 - T_1);$$

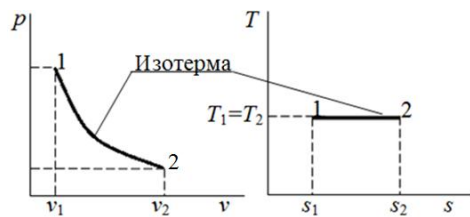


Рис. 2.3. p - v -, T - s -диаграммы изотермического процесса

$$\Delta s = s_2 - s_1 = c_p \ln \frac{T_2}{T_1}.$$

3. Изотермический процесс $T=\text{const}$, $dT=0$. В уравнении политропного процесса $Tv^{n-1}=\text{const}$, условие $T=\text{const}$ удовлетворяется при $n=1$, а теплоемкость изотермического процесса (рис. 2.3) определяется из выражения $c = c_v \frac{n-k}{n-1} = \infty$.

Из уравнения состояния (при $T=\text{const}$) следует $pv=R_r T = \text{const}$,
 $pv=p_1 v_1=p_2 v_2 \Rightarrow p_1 v_1 = p_2 v_2$.

Перечень величин в изотермическом процессе взаимосвязан следующими соотношениями:

$$p_1 v_1 = p_2 v_2;$$

$$l_{1-2} = p_1 v_1 \ln \frac{p_1}{p_2}; l_{1-2} = R_\Gamma T_1 \ln \frac{v_1}{v_2};$$

$$q_{1-2} = l_{1-2};$$

$$\Delta u = u_2 - u_1 = 0;$$

$$\Delta h = h_2 - h_1 = 0;$$

$$\Delta s = s_2 - s_1 = R_\Gamma \ln \frac{v_2}{v_1};$$

$$T_2 = T_1.$$

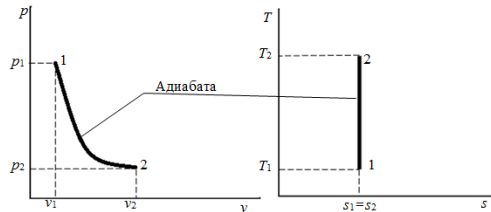


Рис.2.4. p - v , T - s -диаграммы адиабатного процесса

4. Адиабатный процесс. Адиабатный процесс (рис. 2.4) протекает без теплообмена с окружающей средой, при соблюдении условия $\delta q = 0$. Из выражения при $\delta q = 0$ следует $c = \frac{\delta q}{\Delta T} = \frac{0}{\Delta T} = 0$, т.е. теплоемкость адиабатного процесса $c = 0$.

Из $ds = \frac{\delta q}{T}$, следовательно $ds = 0$, $s = \text{const}$. Следовательно, в адиабатном процессе энтропия не изменяется. Показатель политропы при адиабатном процессе $n = \frac{0 - c_p}{0 - c_v} = \frac{c_p}{c_v}$, который обозначается $k = \frac{c_p}{c_v}$, как было отмечено выше, и называется показателем адиабаты. Уравнение, описывающее адиабатный процесс, имеет вид $p v^k = \text{const}$, из которого следует $p v^k = p_1 v_1^k = p_2 v_2^k$.

Перечень величин при адиабатном процессе должен удовлетворять следующим соотношениям

$$p_1 v_1^k = p_2 v_2^k;$$

$$T_1 v_1^{k-1} = T_2 v_2^{k-1};$$

$$T_1 p_1^{k-1} = T_2 p_2^{k-1};$$

$$l_{1-2} = u_1 - u_2;$$

$$l_{1-2} = R_r \frac{T_1 - T_2}{k-1};$$

$$\Delta u = u_2 - u_1 = c_v (T_2 - T_1);$$

$$\Delta h = h_2 - h_1 = c_p (T_2 - T_1);$$

$$\Delta s = s_2 - s_1 = 0, s_2 = s_1.$$

5. Политропные процессы. Термодинамические процессы, которые описываются уравнением $p \cdot v^n = \text{const}$, называются политропными. В этом уравнении показатель политропы меняется в пределах $-\infty < n < +\infty$. На рис. 2.5 приведены: изохора ($n = \pm\infty$), изобара ($n = 0$), изотерма ($n = 1$), адиабата ($n = k$).

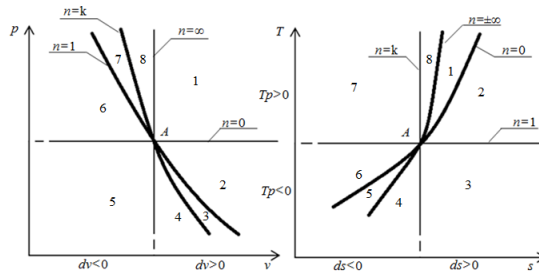


Рис. 2.5. p - v -, T - s -диаграммы в зависимости от величины показателя политропы n .

Все соотношения, вытекающие из уравнений политропных процессов $p v^n = \text{const}$; $T v^{n-1} = \text{const}$; $T^n p^{1-n} = \text{const}$, должны быть аналогичными соотношениям, вытекающим из соответствующих уравнений адиабатного процесса, и получаются путем замены показателя адиабаты k на показатель политропы n . Однако при этом необходимо иметь в виду, что теплоемкость политропного процесса определяется по формуле $c = c_v \frac{n-k}{n-1}$, а также теплота, участвующая в процессе, в этом случае определяется исходя из уравнения первого закона термодинамики:

$$q_{1-2} = u_2 - u_1 + l_{1-2} = \left(c_v - \frac{R_r}{n-1} \right) (T_2 - T_1).$$

Перечень величин в политропном процессе должен удовлетворять следующим соотношениям:

$$p_1 v_1^n = p_2 v_2^n;$$

$$T_1 v_1^{n-1} = T_2 v_2^{n-1};$$

$$T_1^n p_1^{1-p} = T_2^n p_2^{1-p};$$

$$l_{1-2} = u_1 - u_2 = R \frac{T_1 - T_2}{n-1};$$

$$\Delta u = u_2 - u_1 = c_v (T_2 - T_1);$$

$$\Delta h = h_2 - h_1 = c_p (T_2 - T_1);$$

$$\Delta s = s_2 - s_1 = \left(c_v \frac{n-k}{n-1} \right) \ln \frac{T_2}{T_1};$$

$$\Delta s = s_2 - s_1 = \left(c_p \frac{n-k}{n} \right) \ln \frac{p}{p_1};$$

$$\Delta s = s_2 - s_1 = (c_v (n-k)) \ln \frac{v_1}{v_2};$$

$$q_{1-2} = u_2 - u_1 + l_{1-2} = \left(c_v - \frac{R \gamma}{n-1} \right) (T_2 - T_1).$$

Задание 1.1. V_1 , м³, газа при абсолютном давлении p_1 температуре t_1 °С расширяется до увеличения объема в ε раз. Определить параметры конечного состояния газа, количество теплоты, работу, а также изменения внутренней энергии, энтальпии и энтропии в процессах: а) изотермическом, б) адиабатном при $k=1,4$; в) политропном при показателе политропы $n=1,47$. Принять $c_v=0,7$ кДж/(кг·К) и $R_\gamma=290$ Дж/(кг·К). Процессы изобразить (совместно) в p - v - и T - s - диаграммах. Данные для расчета выбрать из табл. 2.1, по двум последним цифрам шифра.

Таблица 2.1

Последняя цифра шифра	V_1 , м ³	ε	Предпоследняя цифра шифра	p_1 , МПа	t_1 , °С
9	0,6	15	9	5,5	1180
8	0,5	14	8	5,8	1830
7	0,4	13	7	6,0	1850
6	0,3	12	6	6,2	1870
5	0,2	16	5	6,3	1890
4	0,1	14	4	6,4	2030
3	0,09	13	3	6,5	1930
2	0,08	15	2	6,6	1950
1	0,07	13	1	6,7	2130
0	0,06	14	0	7,0	1930

Задание 2.2. В изобарном процессе расширения к 1 кг воздуха от начального давления p_1 подводится q_1 , кДж/кг, теплоты.

Определить параметры конечного состояния воздуха, работу расширения, изменения внутренней энергии, энтальпии и энтропии. Изобразить процесс в $p\nu$ - и Ts - диаграммах. Данные, необходимые для решения задачи, выбрать из табл. 2.2, по двум последним цифрам шифра.

Таблица 6

Последняя цифра шифра	p_1 , МПа	Предпоследняя цифра шифра	q_1 , кДж/кг
9	3,0	9	500
8	3,5	8	480
7	4,0	7	460
6	4,5	6	440
5	5,0	5	420
4	6,0	4	400
3	7,0	3	430
2	8,0	2	450
1	9,0	1	470
0	10,0	0	490

Задание 2.3. V_1 , м³, воздуха при начальном давлении p_1 и начальной температуре t_1 расширяются адиабатно (изоэнтропийно) до конечного давления p_2 . Определить параметры конечного состояния и работу расширения воздуха. Данные, необходимые для решения задачи, выбрать из табл. 2.3, по двум последним цифрам шифра.

Таблица 2.3

Последняя цифра шифра	p_1 , МПа	t , °С	Предпоследняя цифра шифра	V_1 , м ³	p_2 , кПа
9	2,5	350	9	2	5,00
8	2,0	320	8	4	50,0
7	3,6	340	7	6	10,0
6	12,0	550	6	8	20,0
5	5,0	450	5	10	6,00
4	4,0	440	4	12	3,00
3	9,0	500	3	14	6,00
2	15,0	550	2	16	80,0
1	3,0	320	1	18	30,0
0	10,0	600	0	20	60,0

Практическое занятие № 3

Расчет термодинамических циклов двигателей внутреннего сгорания различными способами подвода теплоты

Методические указания.

Рассмотрим цикл в координатах p, v и T, s , следуя рис. 3.1.

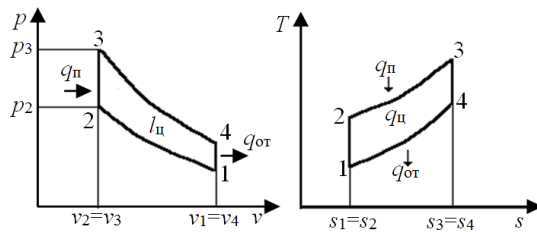


Рис. 3.1. Термодинамический цикл ДВС с изохорным подводом теплоты

Параметры точки 1: p_1 , Па; $T_1=273+t_1$, К.

Удельный объем определяется с помощью формулы:

$$pv = R_B T \Rightarrow v_1 = \frac{R_B T_1}{p_1}.$$

Параметры точки 2: находим, исследуя адиабатный процесс 1-2, который описывается формулой:

$$p_1 v_1^k = p_2 v_2^k \Rightarrow p_2 = p_1 \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^k = p_1 \epsilon^k.$$

В соответствии с формулой адиабатного процесса:

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

Для нахождения параметров точек 3, 4 составляются зависимости, соответствующие процессам: 2-3; 3-4; 4-1. Процесс 2-3 - изохорный, $v_3=v_2=\text{const}$. Из уравнения состояния $pv=R_B \cdot T$ следует $\frac{p}{T} = \frac{R_B}{v} = \text{const}$. Следовательно,

$$\frac{p_2}{T_2} = \frac{p_3}{T_3} \rightarrow p_3 = p_2 \left(\frac{T_3}{T_2} \right). \quad (3.1)$$

Для изохорного подвода теплоты справедлива зависимость

$$q_1 = c_v \cdot (T_3 - T_2). \quad (3.2)$$

Процесс 3-4 - адиабатный:

$$p_3 v_3^k = p_4 v_4^k. (3.3)$$

Процесс 4-1 - изохорный:

$$v_4 = v_1, \quad p_4 = p_1 \left(\frac{T_4}{T_1} \right); (3.4)$$

и изохорный отвод теплоты

$$q_2 = c_v \cdot (T_4 - T_1). (3.5)$$

В уравнениях (3.1 – 3.5) неизвестными являются p_3 , T_3 , p_4 , T_4 , q_1 . Решая эту замкнутую систему уравнений, находим искомые величины:

$$T_4 = T_1 + \frac{q_2}{c_v}; \quad p_4 = p_1 \frac{T_4}{T_1}; \quad p_3 = p_4 \cdot \varepsilon^k; \quad T_3 = T_2 \frac{p_3}{p_2}.$$

Количество подведенной теплоты находится в соответствии с формулой:

$$q_1 = c_v (T_3 - T_2).$$

Термический КПД определяется по формуле:

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}}.$$

Работа цикла $l_u = q_1 - q_2$, кДж/кг.

Термический КПД цикла Карно в заданном диапазоне температур $T_{\text{н}}^{\text{max}} = T_3$ и $T_{\text{н}}^{\text{min}} = T_1$:

$$\eta_t = 1 - \frac{T_1}{T_3}.$$

Рассмотрим цикл двигателя со смешанным подводом теплоты. Такой цикл изображен на рис. 3.2.

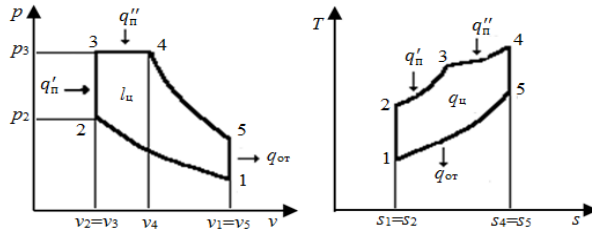


Рис. 3.2. Термодинамический цикл ДВС со смешанным подводом теплоты

Для адиабатного процесса 1-2 определяются параметры состояния в точках 1 и 2:

Точка 1. p_1, T_1, V_1 - из условия задачи, $M_1 = \frac{p_1 V_1}{RT_1}$;

Точка 2. $p_2 = p_1 \varepsilon^k$; $T_2 = T_1 \varepsilon^{k-1}$; $V_2 = \frac{M_1 R T_2}{p_2}$.

Для изохорного процесса 2-3 определить параметры состояния в точках 2 и 3, принимая $V_2 = V_3 = \text{const}$ и Q_v - подвод теплоты.

Точка 3. Из уравнения $Q_v = M c_v (T_3 - T_2)$ определяется

$$T_3 = \frac{Q_v}{M c_v} + T_2; \quad \frac{p_3}{p_2} = \frac{T_3}{T_2} = \lambda \Rightarrow p_3 = p_2 \lambda,$$

λ - степень повышения давления.

Для изобарного процесса 3-4 определить параметры состояния в точках 3 и 4, принимая $p_3 = p_4 = \text{const}$ и Q_p - подвод теплоты из условия задачи:

Точка 4. Из уравнения $Q_p = M c_p (T_4 - T_3)$ определяется

$$T_4 = \frac{Q_p}{M c_p} + T_3; \quad \frac{V_4}{V_3} = \frac{T_4}{T_3} = \rho \Rightarrow V_4 = V_3 \rho,$$

где ρ - степень предварительного расширения.

Для адиабатного процесса 4-5 определить параметры состояния в точках 4 и 5, принимая $V_5 = V_1$ и $dq = 0$ - процесс протекает без теплообмена с окружающей средой:

$$T_5 = T_4 \left(\frac{V_4}{V_5} \right)^{k-1}; \quad p_5 = p_4 \left(\frac{V_4}{V_5} \right)^k.$$

Для изохорного процесса 5-1, принимая $V_5 = V_1 = \text{const}$, определить количество отводимой теплоты:

$$Q_{5-1} = M c_v (T_5 - T_1).$$

В соответствии с первым законом термодинамики, определить для каждого процесса изменение внутренней энергии (du), энтропии (ds), энтальпии (dh), работу (L) и термодинамический КПД цикла (x соответствует точке процесса):

$$du_{x-(x+1)} = M c_v (T_{x+1} - T_x);$$

$$dh_{x-(x+1)} = c_{pv} (T_{x+1} - T_x);$$

$$ds_{x-(x+1)}^{v=\text{const}} = M c_v \ln \frac{T_{x+1}}{T_x} = M c_v \ln \frac{p_{x+1}}{p_x};$$

$$ds_{x-(x+1)}^{p=const} = Mc_p \ln \frac{T_{x+1}}{T_x} = Mc_p \ln \frac{p_{x+1}}{p_x}.$$

Работа сжатия:

$$\text{в процессе 1-2} - L_{1-2} = \frac{MR}{k-1} (T_1 - T_2);$$

$$\text{в процессе 2-3} - L_{2-3}=0, \text{ т.к. } dv = 0;$$

$$\text{в процессе 3-4} - L_{3-4} = MR(T_4 - T_3);$$

$$\text{в процессе 4-5} - L_{4-5} = \frac{MR}{k-1} (T_4 - T_5);$$

$$\text{в процессе 5-1} - L_{5-1}=0.$$

Термический КПД цикла:

$$\eta_t = \frac{Q_{\text{подв}} - Q_{\text{отв}}}{Q_{\text{подв}}} \text{ или}$$

$$\eta_t^{\text{см}} = 1 - \frac{q_{\text{от}}}{q_{\text{п}}} = 1 - \frac{\lambda \cdot \rho^k - 1}{(\lambda - 1) + k \cdot \lambda (\rho - 1) \varepsilon^{k-1}}$$

Задание 3.1.

Определить термический КПД цикла двигателя внутреннего сгорания с изобарным подводом теплоты, если количество подведенной теплоты составляет q_1 , температура рабочего тела (воздуха) в конце сжатия t_2 , степень сжатия ε . Сжатие и расширение происходит по адиабатам. Как изменится термический КПД цикла, если при том же количестве подведенной теплоты q_1 часть q_1' (%) подвести по изохоре? Цикл изобразить в $p\nu$ - и Ts - диаграммах. Данные для решения выбрать из табл. 3.1, по двум последним цифрам шифра.

Таблица 3.1

Последняя цифра шифра	q_1 , кДж/кг	t_2 , °C	Предпоследняя цифра шифра	ε	q_1' , %
9	1680	600	9	11	29
8	1120	450	8	12	25
7	1200	500	7	13	20
6	1240	910	6	14	30
5	1400	1000	5	15	25
4	1610	850	4	16	20
3	1440	1050	3	14	27
2	1640	900	2	12	24
1	1360	920	1	16	28
0	1160	1000	0	15	30

Задание 3.2.

Рассчитать цикл ДВС с изохорным подводом теплоты (цикл Отто), если начальные параметры рабочего тела $p_1=0,1$ МПа, t_1 , степень сжатия ϵ , а отведенная теплота q_2 кДж/кг. Определить параметры состояния рабочего тела в характерных точках цикла, подведенное количество теплоты q_1 , работу цикла l_u и термический КПД η_t , а также термический КПД цикла Карно в том же диапазоне температур. Цикл изобразить в $p\nu$ - и Ts - диаграммах. Рабочее тело - воздух.

Средняя изохорная теплоемкость $c_{vm}=0,716$ кДж/(кг·К); удельная газовая постоянная $R_v=287$ Дж/(кг·К); показатель адиабаты $k=1,4$. Данные для решения выбрать из табл. 3.2, по двум последним цифрам шифра.

Таблица 3.2

Последняя цифра шифра	q_2 , кДж/кг	t_1 , °С	Предпоследняя цифра шифра	ϵ
9	320	20	9	6
8	330	21	8	7
7	340	22	7	8
6	350	23	6	5
5	360	24	5	6
4	310	25	4	7
3	300	26	3	5,5
2	290	27	2	6,5
1	325	28	1	7,5
0	335	29	0	6

Задание 3.3.

Рассчитать смешанный цикл двигателя внутреннего сгорания, т.е. найти параметры p , ν и t для характерных точек цикла, изменение внутренней энергии, энтальпии, энтропии, а также работу в отдельных процессах и цикле. Определить также степень предварительного расширения, степень повышения давления и термический КПД цикла. Параметры выбрать из табл. 3.3.

Дополнительные данные для расчета: начальный объем - $V_1 = 0,001$ м³; количество теплоты, подводимой в изобарном процессе - $Q_p=1,05$ кДж; количество теплоты, подводимой в изохорном процессе - $Q_v=0,65$ кДж; средние теплоемкости - $c_p=1,15$ кДж/(кг·К), $c_v=0,85$ кДж/(кг·К); показатель адиабаты k равен 1,4; газовая постоянная $R=330$ Дж/(кг·К). Степень сжатия ϵ . Изобразить цикл в $p\nu$ - и $T-s$ диаграммах.

Таблица 3.3

Варианты и исходные данные										
Параметры	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Последняя цифра шифра										
p_1 , МПа	0,08	0,085	0,09	0,1	0,11	0,12	0,095	0,085	0,08	0,9
t_1 , °С	57	47	77	87	97	67	87	77	67	57
Предпоследняя цифра шифра										
ε	16	14	15	17	18	14,5	15,5	16,5	17,5	16

Практическое занятие № 4 Расчет теплопередачи через плоскую стенку

Теплопроводность.

Предварительно необходимо схематично изобразить процесс передачи теплоты теплопроводностью через плоскую стенку.

1. Определить количество теплоты, переданное через стенку нагревательной печи: $Q = \frac{\lambda}{d} F (T_{ст1} - T_{ст2})$.

Теплообмен при конвекции и фазовых превращениях.

Предварительно необходимо схематично изобразить плоскую стенку и обозначить на ней подвод и отвод теплоты, температурные поля и размеры пластины.

1. Определить коэффициент теплопередачи при обтекании плоской пластины с двух сторон водой с температурой $t_{ж1}$ и $t_{ж2}$:

$$k = \frac{1}{\sum R_i}; \sum R_i = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}} + \frac{1}{\alpha_2}, (\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}.$$

2. Определить коэффициент теплопередачи при обтекании плоской пластины с одной стороны водой и с другой стороны воздухом с температурой $t_{ж1}$ и $t_{ж2}$:

$$k' = \frac{1}{\sum R_i}; \sum R_i = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}} + \frac{1}{\alpha_2}, (\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}.$$

3. Определить для обоих случаев удельный тепловой поток:

$$q = k(T_{ж1} - T_{ж2}) \text{ Вт/м}^2 \text{ и } q' = k'(T_{ж1} - T_{ж2}) \text{ Вт/м}^2.$$

4. Значения температур на поверхности стенки определяется из соотношения:

$$\text{а) } T_{\text{ст.1}} = T_{\text{ж1}} - \frac{q}{\alpha_1} \text{ К; } T_{\text{ст.2}} = T_{\text{ж2}} + \frac{q}{\alpha_2} \text{ К - при обтекании}$$

пластины водой;

$$\text{б) } T_{\text{ст.1}} = T_{\text{ж1}} - \frac{q^I}{\alpha_1} \text{ К; } T_{\text{ст.2}} = T_{\text{ж2}} + \frac{q^I}{\alpha_2} \text{ К - при обтекании}$$

пластиной вода-воздух.

5. Определить коэффициент теплопередачи плоской стенки покрытой накипью с двух сторон и при обтекании ее водой:

$$K_H = \frac{1}{\sum R_i}; \sum R_i = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_n}{\lambda_n} + \frac{\delta_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст}}} + \frac{\delta_n}{\lambda_n} + \frac{1}{\alpha_2} \text{ (м}^2 \cdot \text{К)/Вт.}$$

6. Удельный тепловой поток для плоской стенки покрытой накипью и температура стенок определяется по формулам:

$$q_H = K_H \cdot (T_{\text{ж1}} - T_{\text{ж2}}) \text{ Вт/м}^2; \quad T_{\text{ст.1}}^H = T_{\text{ж1}} - \frac{q_H}{\alpha_1} \text{ К;}$$

$$T_{\text{ст.2}}^H = T_{\text{ж2}} + \frac{q_H}{\alpha_2} \text{ К.}$$

7. Перепад температур по толщине плоской стенки определится из соотношения:

$$\text{а) } T_{\text{ст.1}} - T_{\text{ст.2}} = \frac{q \cdot \delta_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст}}}; \quad \text{б) } T_{\text{ст.1}} - T_{\text{ст}}^I = \frac{q^I \cdot \delta_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст}}};$$

$$\text{в) } T_{\text{ст.1}}^H - T_{\text{ст.2}}^H = q_H \cdot \left(\frac{2 \cdot \delta_n}{\lambda_n} + \frac{\delta_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст}}} \right).$$

Задача 4.1. Поверхность нагрева состоит из плоской стальной стенки толщиной δ . По одну сторону стенки движется горячая вода, средняя температура которой $t_{\text{ж1}}$, по другую – вода со средней температурой $t_{\text{ж2}}$ или воздух, средняя температура которого $t_{\text{ж2}}^I$. Определить для обоих случаев удельный тепловой поток q Вт/м² и коэффициент теплопередачи, а также значения температур на обеих поверхностях стенки. Найти изменение удельного теплового потока Δq для первого случая, если с каждой стороны стальной стенки

появится накипь толщиной в 1 мм. Коэффициенты теплопроводности стали $\lambda_{ст} = 45 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, а накипи $\lambda_{нак} = 0,6 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$. Коэффициенты теплоотдачи для горячей воды к стенке для обоих случаев α_1 , от стенки к воде α_2^I , а от стенки к воздуху α_2^II . Параметры выбрать из табл. 4.1.

Таблица 4.1

Варианты и исходные данные										
Параметры	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Последняя цифра шифра										
$\delta, \text{ мм}$	5	8	7	4	6	5	4	7	8	6
$t_{ж1}, ^\circ\text{C}$	110	120	130	105	125	115	135	110	120	125
$t_{ж2}, ^\circ\text{C}$	60	50	65	45	55	40	60	50	55	55
$t_{ж2}^I, ^\circ\text{C}$	25	30	35	20	30	25	30	25	30	55
Предпоследняя цифра шифра										
$\alpha_1, \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$	2000	1900	1800	2100	2200	2050	2150	1850	1950	2250
$\alpha_2^I, \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$	1250	1150	1200	1050	1100	1000	1150	1100	1100	1250
$\alpha_2^{II}, \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$	18	20	25	22	25	18	20	24	25	20

Задача 4.2. Температура внутренней поверхности кладки нагревательной печи t_1 , наружной поверхности t_2 . Определить потери теплоты через 1 м^2 кладки. Материал кладки, коэффициент теплопроводности λ и толщина стенки d заданы в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Послед. цифра шифра	$t_1, ^\circ\text{C}$	$t_2, ^\circ\text{C}$	Предпол. цифра шифра	Материал	$\lambda, \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$	$d, \text{ мм}$
9	1500	130	9	Шамот	1.22	120
8	1450	125	8	Шамот	1.22	250
7	1400	120	7	Магнезит	1.43	120
6	1350	115	6	Магнезит	1.43	250
5	1300	110	5	Динас	1.75	120
4	1250	105	4	Динас	1.75	250
3	1700	190	3	Циркон	2.26	120

2	1650	180	2	Циркон	2.26	250
1	1600	170	1	Периклаз	7.13	120
0	1550	160	0	Периклаз	7.13	250

Задача 4.3. Температура наружной поверхности стены нагревательной печи – t_1 , окружающего воздуха t_2 . Высота стены - a , ширина - b . Определить тепловой поток, передаваемый конвекцией от поверхности стены к воздуху. Использовать теплофизические параметры сухого воздуха из П.5 приложения. За определяющий геометрический размер взять высоту стены. Необходимые данные для расчета выбрать из табл.4.3.

Таблица 4.3

Последняя цифра шрифта	$t_1, ^\circ\text{C}$	$t_2, ^\circ\text{C}$	Предпоследняя цифра шрифта	$a, \text{ м}$	$b, \text{ м}$
9	130	25	9	2,5	4,0
8	125	20	8	2,0	3,5
7	120	15	7	1,5	3,0
6	110	10	6	2,5	4,0
5	105	10	5	2,0	3,5
4	100	10	4	1,5	3,0
3	130	25	3	2,0	4,0
2	120	20	2	2,5	3,5
1	110	15	1	2,0	3,0
0	100	10	0	1,5	4,0

Практическое занятие № 5

Расчет лучистого теплообмена между телами

Предварительно следует схематично изобразить процесс передачи теплоты излучением между стальными плитами.

1. Определить значение приведенной степени черноты:

$$E_{\text{пр}} = \frac{1}{\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} - 1}$$

2. Определить тепловой поток излучения между плитами:

$$Q_{1-2} = E_{\text{ПР}} \cdot C_0 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \cdot F \cdot$$

Задача 5.1. Определить количество теплоты, передаваемой излучением, от нагретой стальной плиты с температурой t_1 к параллельно расположенной другой такой же плите с температурой t_2 . Степень черноты $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0,85$. Данные принять из табл. 5.1.

Таблица 5.1

Последняя цифра шифра	$t_1, ^\circ\text{C}$	Предпоследняя цифра шифра	$t_2, ^\circ\text{C}$
9	950	9	200
8	925	8	180
7	900	7	160
6	875	6	140
5	850	5	120
4	825	4	100
3	800	3	80
2	775	2	60
1	750	1	40
0	725	0	20

Практическое занятие № 6 Тепловой расчет теплообменника

Предварительно следует схематично изобразить противоточный (ПТ) и прямоточный (ПМ) теплообменники, а график в координатах Т-Ф изменения температур воды, масла и воздуха при движении их по теплообменнику.

1. Определить температурный напор на входе и выходе в противоточном водомасляном теплообменнике:

Если отношение $\frac{\Delta T_B}{\Delta T_M} > 2$, тогда

$$\Delta T_M$$

$$\Delta T_B = T_1^I - T_2^II; \Delta T_M = T_1^II - T_2^I;$$

$$\Delta T^{ПМ} = \frac{\Delta T_B - \Delta T_M}{\ln \Delta T_B / \Delta T_M}, \text{ где } \Delta T_B = T_1^I - T_2^I; \Delta T_M = T_1^II - T_2^II;$$

Если отношение $\frac{\Delta T_B}{\Delta T_M} \leq 2$, тогда

$$\Delta T^{ПТ} = \Delta T^{ПМ} = 0,5(\Delta T_B + \Delta T_M).$$

2. Тепловой поток, вносимый горячим воздухом (маслом или водой) в теплообменник, определится по формуле:

$$Q_1 = V_H \cdot c_p^I \cdot (T_1^I - T_1^П) \text{ или } Q_1 = G_{M(B)} \cdot C_p (T_{M(B)}^I - T_{M(B)}^П),$$

где $C_p^I = 1300 \div 1400, \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$ – Объемная теплоемкость воздуха (из П1), а масла и воды из условия задачи.

3. Определить площадь поверхности теплообменника для прямотока и противотока: из уравнения теплового баланса $Q_1 = Q_2$, где $Q_2 = K \cdot F \cdot \Delta T$ – количество теплоты, отданное от «горячего» к «холодному» теплоносителю, откуда площадь теплообменника:

$$F^{ПТ} = \frac{Q_1}{K \cdot \Delta T^{ПТ}} \text{ м}^2; \quad F^{ПМ} = \frac{Q_1}{K \cdot \Delta T^{ПМ}} \text{ м}^2,$$

где $\Delta T^{ПТ}, \Delta T^{ПМ}$ – среднелогарифмический или средний.

4. Расход воды через теплообменник для обеих схем движения теплоносителей определится по формуле:

$$G_B = \frac{Q_1}{F_1 \cdot c_p \cdot (T_2^П - T_2^I)} \text{ кг/с},$$

где $c_p = 4178 \div 4200 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ – массовая теплоемкость воды при $60 \div 90 \text{ }^\circ\text{C}$; F_1 – соответственно площадь поверхности теплообмена для противотока и прямотока.

Задача 6.1. Отработавшее масло дизеля охлаждается в противоточном водяном теплообменнике. Расход масла G , его температура на входе t_M^I , на выходе $t_M^П$, теплоемкость $c_{pm} = 2 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$. Температура воды на входе t_B^I , на выходе $t_B^П$. Коэффициент теплопередачи $K = 200 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Определить площадь поверхности теплообмена. Параметры выбрать из табл. 6.

Таблица 6.1

Варианты и исходные данные

Параметры	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Последняя цифра шифра										
$G, \text{ кг/с}$	0.5	0.7	0.9	1.1	1.3	1.5	1.7	1.9	2.1	2.3
$t_M^I, ^\circ\text{C}$	110	105	100	95	115	110	105	100	95	90
$t_M^{II}, ^\circ\text{C}$	75	70	80	75	70	80	75	70	80	65
Предпоследняя цифра шифра										
$t_B^I, ^\circ\text{C}$	10	5	0	25	20	15	10	5	0	15
$t_B^{II}, ^\circ\text{C}$	25	15	15	35	30	30	20	25	20	30

Задача 6.2. Определить поверхность нагрева рекуперативного водовоздушного теплообменника при прямоточной и противоточной схемах движения теплоносителей, если объемный расход воздуха при нормальных условиях V_n , средний коэффициент теплопередачи от воздуха к воде K , начальный и конечные температуры воздуха и воды равны соответственно $t_1^I, t_1^{II}, t_2^I, t_2^{II}$. Определить также расход воды G через теплообменник. Изобразить график изменения температур теплоносителей для обеих схем движения теплоносителей по поверхности аппарата. Данные, необходимые для решения задачи, выбрать из табл. 6.2.

Таблица 6.2

Варианты и исходные данные										
Параметры	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Последняя цифра шифра										
$V_n \cdot 10^{-3}, \text{ м}^3/\text{ч}$	20	25	50	45	40	35	30	55	10	15
$K, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$	19	20	21	22	23	24	25	26	27	18
Предпоследняя цифра шифра										
t_1^I	480	460	440	420	400	380	360	340	320	500
$t_1^{II}, ^\circ\text{C}$	240	230	210	200	180	160	130	140	120	250

$t_2^I, ^\circ\text{C}$	15	20	25	30	35	40	45	50	15	10
$t_2^{II}, ^\circ\text{C}$	95	100	105	110	115	120	120	130	100	90

Задача 6.3. Определить поверхность нагрева F трубчатого теплообменного аппарата, обогреваемого продуктами сгорания от нагревательной печи, при прямоточном и противоточном движении воздуха и дымовых газов. Воздух поступает в теплообменник при температуре $t_{B1} = 20^\circ\text{C}$, объёмный расход подаваемого воздуха V , коэффициент теплопередачи K . Температуру воздуха на выходе из теплообменника t_{B2} , а также температуры дымовых газов на входе в теплообменника $t_{Г1}$ и на выходе из него $t_{Г2}$ определить из табл. 6.3.

Таблица 12

Последняя цифра шифра	$V, \text{м}^3/\text{с}$	$K, \text{м}^2 \cdot \text{К}$	Предп. ц. шифра	$t_{B2}, ^\circ\text{C}$	$t_{Г1}, ^\circ\text{C}$	$t_{Г2}, ^\circ\text{C}$
9	0.4	16	9	190	550	220
8	0.5	17	8	200	600	240
7	0.6	18	7	200	500	260
6	0.7	19	6	250	550	300
5	0.8	20	5	180	450	220
4	0.9	21	4	200	500	280
3	1.0	22	3	180	480	240
2	1.1	23	2	200	550	250
1	1.2	24	1	200	650	280
0	1.3	25	0	190	600	270

Практическое занятие № 7

Расчет давления жидкости на стенки

Из определения гидростатического давления следует, что сила давления жидкости на стенку может быть найдена суммированием произведений гидростатического давления на

величину элементарной площадки или, в пределе, интегрированием сил давления по площади стенки F .

Величина силы избыточного давления на элементарную площадку dF (рис. 7.1) равна:

$$dP = p_{\text{изб}} dF = \rho g h dF.$$

Сила давления на всю площадку F определяется интегрированием элементарного давления по площади F .

Статический момент фигуры F относительно свободной поверхности жидкости, равный, согласно выводам теоретической механики, произведению площади F на глубину h_c погружения центра тяжести фигуры C :

$$\int h dF = h_c F.$$

F

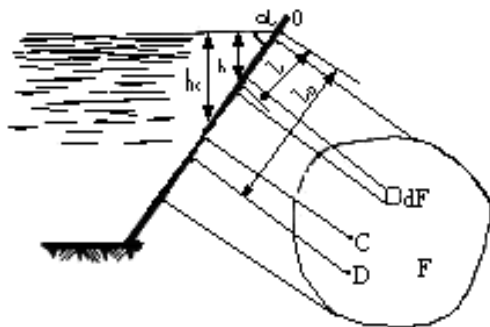


Рис. 7.1.

Таким образом, имеем

$$P = \rho g h_c F = p_{\text{изб.}C} F,$$

где $p_{\text{изб.}C}$ - гидростатическое давление в центре тяжести фигуры. Например, сила избыточного давления на прямоугольный щит шириной b , длиной l , установленный под углом α к поверхности жидкости, равна

$$P = \rho g h_c F = (\rho g b l^2 / 2) \sin \alpha = 0,5 \rho g b l^2 \sin \alpha.$$

Точка приложения равнодействующей силы давления, называемая *центром давления*, лежит ниже центра тяжести C на расстоянии $e = J_c / (F l_c)$, называемом *эксцентриситетом давления*.

Равнодействующая сил давления на криволинейную стенку может быть определена суммированием сил давления на элементарные площадки, которые можно считать плоскими. Обычно задача определения равнодействующей давления на криволинейную

стенку сводится к нахождению ее составляющих по координатным осям.

Задание. Определить силу, действующую на стенку сосуда с прямолинейными стенками шириной b и длиной l , расположенными под углом α . Сосуд заполнен жидкостью с плотностью ρ . Исходные данные выбираются согласно варианта из таблицы 7.1.

Таблица 7.1.

Параметры	Номер варианта и исходные данные									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
b , м	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
l , м	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	0,9	1	1,1	1,2	1,3
ρ , т/м ³	13	1,5	1,4	1,3	1,2	1,1	1,0	0,9	0,95	0,9
α , град	30	35	40	35	30	25	20	15	10	5

Практическое занятие № 8

Гидравлический расчет трубопроводов, расходомеров, гидроудара

Задание 8.1. Эффект уменьшения давления при возрастании скорости течения используется для измерения скорости и расхода потока. Рассмотрим *расходомер Вентури*, представляющий собой трубу с плавным сужением и последующим расширением (рис. 8.1а). Перед сужением (сечение 1 - 1) и в наименьшем сечении трубы 2-2 установлены пьезометры.

Применим уравнение Бернулли к выбранным сечениям потока несжимаемой жидкости и пренебрежем поначалу потерями напора между ними. Имеем

$$\alpha w_1^2 / (2g) + p_1 / (\rho g) = \alpha w_2^2 / (2g) + p_2 / (\rho g).$$

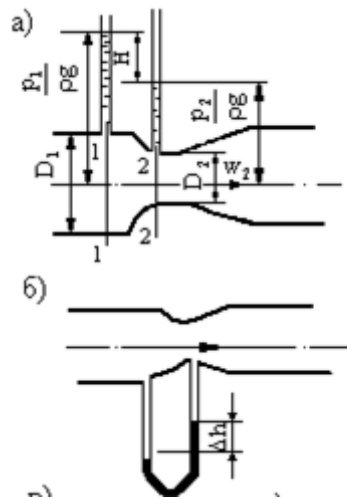


Рис. 8.1. Расходомер Вентури

Уравнение неразрывности $wF = \text{const}$ позволяет выразить w_1 через w_2 :

$$w_1 = w_2 F_2 / F_1 = w_2 D_2^2 / D_1^2.$$

Подставляя значения w в уравнение Бернулли, получаем

$$[\alpha w_2^2 / (2g)][1 - (F_2/F_1)^2] = (p_1 - p_2) / (\rho g) = H,$$

где H - разность уровней жидкости в пьезометрах. Отсюда расход, вычисляемый по средней скорости в сжатом сечении, равен

$$Q = w_2 F_2 = F_2 \sqrt{\frac{2gH}{\alpha \left(1 - \frac{F_2}{F_1}\right)}}.$$

При практическом использовании расходомеров величину расхода определяют по упрощенной формуле

$$Q = w_2 F_2 = \mu F_2 \sqrt{2gH},$$

где μ - коэффициент расхода, мало отличающийся от единицы и учитывающий соотношение диаметров и потери напора от первого до второго сечений. Величину коэффициента μ определяют экспериментально в заводских условиях, его значения содержатся в паспорте прибора.

Разность давлений в сечениях расходомера Δp определяют обычно с помощью дифманометра (рис. 8.1б), при этом расход вычисляется по формуле

$$Q = \mu F_2 \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}$$

При достаточно большой скорости течения падение давления в сжатом сечении расходомера может оказаться столь значительным, что давление здесь оказывается ниже давления паров, насыщающих пространство при данной температуре (некоторые данные для воды приведены в табл. 8.1. При этом начинается холодное кипение жидкости, или кавитация (от латинского слова кавитас – углубление, полость).

Таблица 8.1

$t, ^\circ\text{C}$	0	20	40	60	80	100	120	140	160
$p_n, \text{кПа}$	0,6	2,4	7,5	20,3	48,2	101,3	200	370	620

$$\Delta p = (p_2 + \rho g H) - p_n$$

Для дифманометра на рис. 8.1. $\Delta p = \rho_{pm} g \Delta h - \rho_g g \Delta h$

Задание. В трубе диаметром $D_1 = 50$ мм, подающей воду в открытый бак с постоянным напором H (табл. 8.2), установлена труба Вентури с диаметром горла $D_2 = 25$ мм. Атмосферное давление $p_a = 100$ кПа.

Определить, какой наибольший расход можно подавать в бак до появления кавитации в расходомере, если температура воды t . Каково будет при этом показание ртутного дифманометра Δh ?

Таблица 8.2

Параметры	Номер варианта и исходные данные									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$H, \text{м}$	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
$t, ^\circ\text{C}$	0	20	40	60	80	0	20	40	60	80

Задание 8.2.

Принято измерять потери напора в долях скоростного напора $w^2/(2g)$ по формуле Вейсбаха:

$$h_w = \zeta \frac{w^2}{2g},$$

где ζ - безразмерный коэффициент сопротивления.

Для круглых труб с длиной l и диаметром D потери по длине h_l , связанные с трением о стенки трубы, определяют по формуле Дарси:

$$h_l = \lambda \frac{l}{D} \frac{w^2}{2g},$$

где λ - безразмерный гидравлический коэффициент трения. Очевидно, что формула Дарси представляет собой детализацию формулы Вейсбаха; потери по длине предполагаются пропорциональными длине трубы и обратно пропорциональными диаметру.

При расчете трубопроводов решаются следующие основные задачи:

1. Определение напора H , необходимого для обеспечения заданного расхода Q в трубопроводе.
2. Определение расхода Q в данном трубопроводе при известном напоре H .
3. Определение диаметров труб, обеспечивающих заданный расход при известном напоре.

При решении задачи (определение напора при заданном расходе) вычисляются скорости в трубах. По формуле Вейсбаха определяются местные потери. Вычисляются числа Рейнольдса, по Re и относительной шероховатости труб определяются области сопротивления, для которых находят гидравлические коэффициенты трения $\lambda_{тр}$. По формуле Дарси находят потери по длине и определяют полный напор:

$$H = \Sigma h_l + \Sigma h_m.$$

При неустановившемся движении жидкости в трубах изменение скорости течения во времени приводит к колебаниям давления, которые называются гидравлическим ударом.

Вследствие малой сжимаемости капельных жидкостей и большой жесткости стенок трубы можно считать, что масса жидкости за время Δt внутри остановившегося объема не изменилась; она равна $m = \rho F \Delta l$. Изменение скорости равно $\Delta w = w_0 - 0 = w_0$. Сила f , вызванная изменением количества движения, есть

разность сил давления на торцевых поверхностях выбранного объема:

$$f = (p_0 + \Delta p) F - p_0 F = \Delta p F.$$

Подставляя эти величины в уравнение количества движения, имеем

$$\Delta p = \rho w_0 \Delta l / \Delta \tau.$$

Учитывая, что $\Delta l / \Delta \tau = c$ есть скорость распространения ударной волны, получаем формулу Жуковского:

$$\Delta p = \rho w_0 c.$$

Задание. Из открытого бака вода вытекает в атмосферу по горизонтальному трубопроводу, составленному из труб диаметром D_1 и D_2 (рис. 8.2, табл. 8.3), длины которых $l_1 = 20$ м, $l_2 = 40$ м. Трубы стальные новые, высота выступов шероховатости 0,1 мм, толщина стенки 3 мм. Расход воды Q , коэффициенты местного сопротивления: входа $\zeta_{вх} = 0,5$, резкого расширения $\zeta_{рр} = [(D_1/D_2)^2 - 1]^2$, крана $\zeta_{кр} = 1,0$. Определить напор в баке H и величину ударного давления Δp при мгновенном закрытии крана. Построить диаграмму уравнения Бернулли. Гидравлический коэффициент трения определить по графику приложения.

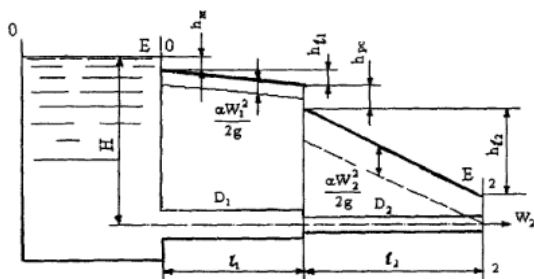


Рис. 8.2.

Таблица 8.3

Параметры	Номер варианта и исходные данные									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$Q \cdot 10^{-3}, \text{ м}^3/\text{с}$	3	3	4	4	5	5	6	6	7	7
$D_1, \text{ мм}$	2	2	3	3	3	3	4	4	5	5
$D_2, \text{ мм}$	4	5	4	5	5	6	6	7	7	8

Практическое занятие № 9
Расчет истечения газа через сопла

1. Определить режим течения сжатого воздуха через суживающееся сопло:

$$\beta = \frac{P_0}{P_1} \text{ сравнить с } \beta_{кр} = 0,528; \text{ если } \beta > \beta_{кр} - \text{ режим}$$

докритический, если $\beta < \beta_{кр}$ – сверхкритический, если $\beta = \beta_{кр}$ – критический.

2. Определить скорость воздуха на срезе сопла

а) Режим докритический:
$$W_2 = \sqrt{\frac{2k}{k-1} \cdot R \cdot T_1 \left[1 - \left(\frac{P_0}{P_1^*} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}, \text{ м/с,}$$

б) Режим критический:
$$W_2 = \sqrt{\frac{2k}{k-1} \cdot R \cdot T_1^*}, \text{ м/с}$$

3. Определить массовый расход воздуха

а) режим докритический:

$$G = F \cdot \sqrt{\frac{2k}{k-1} \cdot \frac{P_1^*}{V_1^*} \cdot \left[\left(\frac{P_0}{P_1^*} \right)^{2/k} - \left(\frac{P_0}{P_1^*} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]} = W_2 \cdot F_2 \cdot \rho_2, \text{ кг/с ;}$$

б) режим критический:

$$G = F \cdot \sqrt{\frac{2k}{k-1} \cdot \frac{P_1}{V_1} \cdot \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{2}{k-1}}} = W_2 \cdot F_2 \cdot \rho_2, \text{ кг/с ,}$$

где $F = \frac{\pi \cdot D^2}{4}$, м² – площадь выходного сечения сопла

4. Определить параметры воздуха на срезе сопла из уравнения состояния $V_1 = R \cdot T_1 / P_1$, где $R = 287$, Дж/кг·К- газовая постоянная воздуха.

Из соотношений параметров адиабатного процесса:

$$(V_2 / V_1)^K = P_1^* / P_0 = 1 / \beta_{кр}, \text{ откуда } V_2 = V_1 / \beta_{кр}^{1/K},$$

$$T_2 / T_1 = (V_1 / V_2)^{K-1}, \text{ откуда } T_2 = T_1 \cdot (V_1 / V_2)^{K-1}$$

$$\text{или } T_2/T_1 = (P_0/P_1^*)^{K-1/K}, \text{ откуда } T_2 = T_1 \cdot (P_0/P_1^*)^{(K-1)/K}$$

Задача 9.1 Сжатый воздух, имеющий давление p_1 и температуру t_1 , подается в печное пространство с абсолютным давлением $p_0 = 0,11$ МПа через сужающееся сопло с диаметром D_0 . Определить скорость и параметры воздуха на срезе сопла и массовый расход. Необходимые данные выбрать из табл. 9.1.

Таблица 9.1

Посл. цифра шифра	p_1 , МПа	t_1 , °С	Предпосл. цифра шифра	D_0 , мм
9	0.7	160	9	15
8	0.65	140	8	20
7	0.6	120	7	25
6	0.55	100	6	30
5	0.5	80	5	35
4	0.45	60	4	40
3	0.4	40	3	45
2	0.35	20	2	50
1	0.3	0	1	55
0	0.25	-20	0	60

Задача 9.2. Через сужающееся сопло мартеновской фурмы диаметром d (диаметр выходного сечения сопла) проходит кислород, имеющий давление P_1 и температуру t_1 на входе в сопло. Давление (абсолютное) среды, в которую происходит истечение кислорода, $P_0 = 101$ кПа. Определить скорость потока на выходе из сопла, массовый расход кислорода через сопло, а также температуру, давление и плотность кислорода на выходе из сопла. Необходимые данные выбрать из табл. 9.3.

Таблица 14

Последняя	P_1 , МПа	t_1 , °С	Предпоследняя	d , мм
-----------	-------------	------------	---------------	----------

цифра шифра			цифра шифра	
9	0,70	40	9	15
8	0,65	35	8	20
7	0,60	30	7	25
6	0,55	25	6	30
5	0,50	20	5	35
4	0,45	15	4	40
3	0,40	10	3	45
2	0,35	40	2	50
1	0,30	30	1	55
0	0,25	20	0	60

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение П.1. Теплофизические свойства сухого воздуха при нормальном атмосферном давлении

$t^{\circ}\text{C}$	$\rho, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$c_p, \frac{\text{кДж}}{\text{кгК}}$	$t^{\circ}\text{C}$	$\rho, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$c_p, \frac{\text{кДж}}{\text{кгК}}$
-50	1.584	1.013	200	0.746	1.026
-30	1.453	1.013	250	0.674	1.038
-10	1.342	1.009	300	0.615	1.047
0	1.293	1.005	350	0.566	1.059
10	1.247	1.005	400	0.524	1.068
30	1.165	1.005	500	0.456	1.093
50	1.093	1.005	600	0.404	1.114
70	1.029	1.009	700	0.362	1.135
100	0.946	1.009	800	0.329	1.156
140	0.854	1.017	900	0.301	1.172
180	0.779	1.022	1000	0.277	1.185

Формулы для определения теплоемкостей:

$$\text{CO}_2 \rightarrow C_p = 0,8654 + 0,0002443 \cdot t$$

$$\text{H}_2\text{O} \rightarrow C_p = 1,838 + 0,0003111 \cdot t$$

$$\text{N}_2 \rightarrow C_p = 1,838 + 0,0008555 \cdot t$$

$$\text{O}_2 \rightarrow C_p = 0,9203 + 0,0001065 \cdot t$$

Приложение П.2.

Средняя массовая теплоемкость газов при постоянном

$$\text{давлении, } c_{pm} \Big|_0^t \frac{\text{кДж}}{(\text{кг} \cdot \text{К})}$$

$t, ^\circ\text{C}$	O ₂	N ₂	CO	CO ₂	H ₂ O	SO ₂	Воздух (сухой)
0	0,9148	1,0304	1,0396	0,8148	1,8594	0,607	1,0036
100	0,9232	1,0316	1,0417	0,8658	1,8728	0,636	1,0061
200	0,9353	1,0346	1,0463	0,9102	1,8937	0,662	1,0115
300	0,9500	1,0400	1,0538	0,9487	1,9192	0,687	1,0191
400	0,9651	1,0475	1,0634	0,9826	1,9477	0,708	1,0283
500	0,9793	1,0567	1,0748	1,0128	1,9778	0,724	1,0387
600	0,9927	1,0668	1,0661	1,0396	2,0092	0,737	1,0496
700	1,0048	1,0777	1,0978	1,0639	2,0419	0,754	1,0605
800	1,0157	1,0881	1,1091	1,0852	2,0754	0,762	1,0710
900	1,0258	1,0982	1,1200	1,1045	2,1097	0,775	1,0815
1000	1,0350	1,1087	1,1304	1,1225	2,1436	0,783	1,0907
1100	1,0434	1,1170	1,1401	1,1384	2,1771	0,791	1,0999
1200	1,0509	1,1258	1,1493	1,1530	2,2106	0,795	1,1082
1300	1,0580	1,1342	1,1577	1,1660	2,2429	-	1,1166
1400	1,0647	1,1422	1,1656	1,1782	2,2743	-	1,1242
1500	1,0714	1,1497	1,1731	1,1895	2,3048	-	1,1313
1600	1,0773	1,1564	1,1798	1,1995	2,3346	-	1,1380
1700	1,0831	1,1631	1,1865	1,2091	2,3630	-	1,1443
1800	1,0886	1,1690	1,1924	1,2179	2,3907	-	1,1501
1900	1,0940	1,1748	1,1983	1,2259	2,4166	-	1,1560
2000	1,0990	1,1803	1,2033	1,2334	2,4422	-	1,1610
2100	1,1041	1,1853	1,2083	1,2405	2,4664	-	1,1664
2200	1,1087	1,1903	1,2129	1,2468	2,4895	-	1,1710
2300	1,1137	1,1945	1,2175	1,2531	2,5121	-	1,1757
2400	1,1183	1,1991	1,2217	1,2586	2,5334	-	1,1803
2500	1,1229	1,2029	1,2259	1,2636	2,5544	-	1,1840
2600	1,1271	-	-	-	2,5745	-	-
2700	1,1313	-	-	-	2,5937	-	-
2800	-	-	-	-	2,6121	-	-
2900	-	-	-	-	2,6297	-	-

Приложение П.3.

Средняя объемная теплоемкость газов при постоянном

давлении, $c_{pm} \Big|_0^t \frac{\text{кДж}}{(\text{м}^3 \cdot \text{К})}$

$t, \text{ }^\circ\text{C}$	O ₂	N ₂	CO	CO ₂	H ₂ O	SO ₂	Воздух (сухой)
0	1,3059	1,2946	1,2992	1,5998	1,4913	1,733	1,2971
100	1,3176	1,2958	1,3017	1,7003	1,5002	1,813	1,3004
200	1,3552	1,2996	1,3071	1,7873	1,5223	1,888	1,3071
300	1,3561	1,3067	1,3167	1,8627	1,5424	1,955	1,3172
400	1,3775	1,3163	1,3289	1,9287	1,5654	2,018	1,3289
500	1,3980	1,276	1,3427	1,9887	1,5897	2,068	1,3427
600	1,4168	1,3402	1,3574	2,0411	1,6148	2,114	1,3565
700	1,4344	1,3536	1,3720	2,0884	1,6412	2,152	1,3708
800	1,4499	1,3670	1,3862	2,1311	1,6680	2,181	1,3842
900	1,4645	1,3796	1,3996	2,1692	1,6957	2,215	1,3976
1000	1,4775	1,3917	1,4126	2,2035	1,7229	2,236	1,4097
1100	1,4892	1,4034	1,4248	2,2349	1,7501	2,261	1,4214
1200	1,5005	1,4143	1,4361	2,2638	1,7769	2,278	1,4327
1300	1,5106	1,4252	1,4465	2,2898	1,8028	-	1,4432
1400	1,5202	1,4348	1,4566	2,3136	1,8280	-	1,4528
1500	1,5294	1,4440	1,4658	2,3354	1,8527	-	1,4620
1600	1,5378	1,4528	1,4746	2,3555	1,8761	-	1,4708
1700	1,5462	1,4612	1,4825	2,3742	1,8996	-	1,4788
1800	1,5541	1,4687	1,4901	2,3915	1,9213	-	1,4867
1900	1,5617	1,4758	1,4972	2,4074	1,9424	-	1,4939
2000	1,5692	1,4825	1,5039	2,4221	1,9628	-	1,5010
2100	1,5759	1,4892	1,5102	2,4359	1,9824	-	1,5072
2200	1,5830	1,4951	1,5160	2,4484	2,0009	-	1,5135
2300	1,5897	1,5010	1,5215	2,4602	2,0189	-	1,5194
2400	1,5964	1,5064	1,5269	2,4710	2,0365	-	1,5253
2500	1,6027	1,5114	1,5320	2,4811	2,0528	-	1,5303
2600	1,6090	-	-	-	2,0691	-	-
2700	1,6153	-	-	-	2,0864	-	-
2800	-	-	-	-	2,0997	-	-
2900	-	-	-	-	2,1135	-	-

Приложение П.4.

Относительные молекулярные массы, плотности и объемы киломолей при нормальных условиях, критические температуры и критические давления некоторых газов

Газ	Химическое обозначение	Относительная молекулярная масса	Плотность $\rho, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	Объем киломоля $\frac{M_{\nu_H}, \text{м}^3}{\text{кмоль}}$	Критическая температура $t, ^\circ\text{C}$
Водяной пар	H ₂ O	18,015	(0,804)	(22,4)	373,946
Воздух	-	28,96	1,2928	22,40	-140,65
Гелий	He ₄	4,0026	0,1785	22,42	-267,96
Аргон	Ar	39,948	1,7837	22,39	-122,50
Водород	H ₂	2,0159	0,08988	22,43	-239,9
Азот	N ₂	28,0134	1,2506	22,40	-146,95
Кислород	O ₂	31,9988	1,42895	22,39	-118,38
Хлор	Cl ₂	70,906	3,214	22,06	143,85
Оксид углерода	CO	28,009	1,2500	22,41	-140,23
Диоксид углерода	CO ₂	44,011	1,9768	22,26	31,05
Сернистый газ	SO ₂	64,0658	2,927	21,89	157,5
Аммиак	NH ₃	17,0304	0,7714	22,08	132,3

Таблица П.5

Физические свойства сухого воздуха ($p_a = 1,013 \cdot 10^5$ Па)

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho,$ кг/м ³	$c_p,$ кДж/(кг $^\circ\text{C}$)	λ Вт/(м $^\circ\text{C}$)	$\nu \cdot 10^{-6},$ м ² /с	Pr
0	1,293	1,005	2,44	13,28	0,707
10	1,247	1,005	2,51	14,16	0,705
20	1,205	1,005	2,59	15,06	0,703
30	1,165	1,005	2,67	16,00	0,701
40	1,128	1,005	2,76	16,96	0,699
50	1,093	1,005	2,83	17,95	0,698
60	1,060	1,005	2,90	18,97	0,696
70	1,029	1,009	2,96	20,02	0,694
80	1,000	1,009	3,05	21,09	0,692
90	0,972	1,009	3,13	22,10	0,690
100	0,946	1,009	3,21	23,13	0,688
200	0,746	1,026	3,93	34,85	0,680
300	0,615	1,047	4,61	48,33	0,670
400	0,524	1,068	5,21	63,09	0,680
500	0,456	1,093	5,75	79,38	0,690
600	0,404	1,114	6,22	96,89	0,690
700	0,362	1,135	6,71	115,4	0,71

Литература

1. Теплотехника: учебник для вузов / Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», В.В. Андреев, В.А. Лебедев, Б.И. Спесивцев, СПб, 2015.

http://irbis.spmi.ru/jirbis2/index.php?option=com_irbis&view=irbis&Itemid=402&task=set_static_req&bns_string=NWPIB,ELC,ZAPIS&req_irb=<.>I=31%2E31%2F%D0%90%2065%2D409490551<.>

2. Теплотехника: Учебное пособие / В.А. Кудинов, Э.М. Карташов, Е.В. Стефанюк. - М.: КУРС: НИЦ ИНФРА-М, 2015. - 424 с. <http://znanium.com/catalog.php?bookinfo=486472>

3. Основы технической термодинамики и теории тепло- и массообмена: Учебное пособие / В.А. Барилевич, Ю.А. Смирнов. - М.: НИЦ ИНФРА-М, 2014. - 432 с.

<http://znanium.com/catalog.php?bookinfo=356818>

4. Теоретические основы теплотехники. Термодинамика [Текст] : учеб.-метод. комплекс / сост.: З. Ф. Каримов, Е. П. Павлов. - СПб. : Изд-во СЗТУ, 2009. - 261 с.

http://irbis.spmi.ru/jirbis2/index.php?option=com_irbis&view=irbis&Itemid=402&task=set_static_req&bns_string=NWPIB,ELC,ZAPIS&req_irb=<.>I=%D0%9C%2D%2D20090423134355<.>

5. Теплотехника [Электронный ресурс] : учеб.пособие / В. С. Дресвянкин, В. Г. Лабейш, Е. П. Павлов. - СПб. : Горн.ун-т, 2013. - 143 с.

http://irbis.spmi.ru/jirbis2/index.php?option=com_irbis&view=irbis&Itemid=402&task=set_static_req&bns_string=NWPIB,ELC,ZAPIS&req_irb=<.>I=%2D548581<.>

6. Теплотехника и ДВС [Электронный ресурс] : учеб.пособие для студентов специальности «Горные машины». Направление подготовки 150400 – Технологические машины и оборудование / В. И. Александров, М. А. Васильева. - СПб. : Горн.ун-т, 2014. - 230 с.

http://irbis.spmi.ru/jirbis2/index.php?option=com_irbis&view=irbis&Itemid=402&task=set_static_req&bns_string=NWPIB,ELC,ZAPIS&req_irb=<.>I=%2D532701<.>

Содержание

1. Методические указания к выполнению практических занятий.....	5
2. Практическое занятие № 1. Определение параметров смеси идеальных газов.....	5
3. Практическое занятие № 2. Расчет термодинамических функций.....	10
4. Практическое занятие № 3. Расчет термодинамических циклов двигателей внутреннего сгорания с различными способами подвода теплоты.....	17
5. Практическое занятие № 4. Расчет теплопередачи через плоскую стенку.....	23
6. Практическое занятие № 5. Расчет лучистого теплообмена между телами.....	27
7. Практическое занятие № 6. Тепловой расчет теплообменника.....	28
8. Практическое занятие № 7. Расчет давления жидкости на стенки.....	31
9. Практическое занятие № 8. Гидравлический расчет трубопроводов, расходомеров, гидроудара.....	33
10. Практическое занятие № 9. Расчет истечения газа через сопла.....	38
11. Приложения.....	42
12. Литература.....	47