

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования  
**«ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ  
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»**  
(ТУСУР)

**УТВЕРЖДАЮ:**

Зав. Кафедрой РЭТЭМ

\_\_\_\_\_ В.И.Туев

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2011г

**Теплотехника**

**Методические указания по практическим занятиям для студентов,  
обучающихся по направлению подготовки бакалавра  
«Техносферная безопасность» 280700.62 (18 часов)**

**Разработчик:**

**к.т.н. Апкарьян А.С.**

## Содержание

1. Определение теплового баланса и к.п.д установки .
2. Определение низшей теплоты сгорания каменного угля.
3. Определение состава и вида топлива.
4. Определение теплоты сгорания твёрдого топлива.
5. Определение теплоты сгорания газообразного топлива
6. Определение количества воздуха для сгорания природного газа и объём продуктов сгорания.
7. Определение массы, изменение энтропии и конечной температуры кислорода, содержащегося в сосуде ёмкостью  $V_1$ , при абсолютном давлении  $P_1$  и температуре  $t_1$ . Определение количество теплоты
8. Определение параметров всех узловых точек цикла ДВС, количество подведённой и отведённой теплоты, работу цикла и теоретический КПД цикла.
9. Определение количества тепла, проходящего в 1 час через  $1 \text{ м}^2$  плоской стенки.
10. Определение суточной потери тепла с 1 м длины изолированного трубопровода.
11. Расчёт и выбор оборудования для калориферной установки и приточной системы вентиляции.
12. Определение конечного объёма  $V_2$ .
13. Определение абсолютного давления ( $P$ ) газа в цилиндре после его расширения.
14. Определение изменения плотности кислорода, если процесс протекал при  $t = \text{const}$ .
15. Определение плотности воздуха.
16. Определение технического КПД цикла.

## Введение

Изучение теплотехники студентами технических высших учебных заведений предусматривает проведение определённого количества практических занятий. В основном это решение задач по темам курса.

В данных методических указаниях для решения задач даются цели и общие разделы теории, ознакомление с которыми необходимо для правильного выбора пути их решения.

Методическое указание не ограничивается только лишь решением задачи, но и даёт возможность проведения анализа при изменении отдельных химических или теплофизических параметров.

В отдельных работах полученные результаты способствуют проведению аналитического описания теплофизических процессов, и составлению графиков.

Указанные в задачах параметры соответствуют реальным характеристикам топлива, оборудования или технологического процесса.

## 1. Тема - топливо и процессы горения.

В лабораторных условиях теплоту сгорания топлива определяют сжиганием навески топлива в калориметрической бомбе, заполненной кислородом. Учитывая повышение температуры воды, находящейся в калориметре, получают количество тепла, выделившегося при сгорании навески топлива.

При сгорании топлива происходит соединение горючих элементов топлива с кислородом по реакциям:

$C + O_2 = CO_2$ ;  $H_2 + 0,5O_2 = H_2O$ ;  $S + O_2 = SO_2$ , с выделением тепла. Чем больше тепла выделяет топливо, тем выше его ценность. Количество тепла, выделяемое при полном сгорании 1 кг. твёрдого и жидкого топлива или 1 м<sup>3</sup> газа, называют теплотой сгорания топлива. Её размерность кДж/кг, кДж/м<sup>3</sup>, кДж/кмоль.

В зависимости от того в каком состоянии – парообразном или жидком – будет влага, находящаяся в продуктах горения, установлены два понятия теплоты сгорания топлива:  $Q_n$ , - если влага находится в парообразном состоянии, и высшая  $Q_v$ , если водяные пары сконденсированы до жидкости. Превращение 1 кг. воды из жидкого состояния в парообразное при температуре 20°C требует затраты 2515 кДж. Так как в продуктах горения содержится влага топлива  $W_1$  и вода  $W_2$ , полученная от сгорания водорода

$H_2O \quad 18$   
(  $W_2 = \frac{\quad}{H_2} = \frac{\quad}{2} = 9$  ), то разница между высшей и низшей теплотой сгорания

топлива составит

$$Q_v^p - Q_n^p = 2515 (W_1 + W_2) = 2515 (W_1 + 9H) \text{ кДж /кг}$$

или если  $W_1$  и  $H$  выражают содержание воды и водорода в топливе в %,

$$Q_v - Q_n = 25,15 (W_1 + 9H) \text{ кДж /кг.}$$

Как видно из уравнения, увеличение содержания влаги в топливе отрицательно сказывается на теплоте сгорания: чем больше  $W_1$ , тем больше разность между  $Q_v^p$  и  $Q_n^p$ . В зависимости от того, к рабочему или сухому составу топлива относится теплота сгорания её обозначают соответствующим индексом:  $Q_v^p$ ,  $Q_n^p$ ,  $Q_v^r$ ,  $Q_n^r$ .

Теплоту сгорания топлива можно подсчитать и по элементарному составу топлива. Для этого используют формулы Д.И.Менделеева (см. в лекциях и в литературе в разделе «Топливо и теория горения»).

Для процесса горения необходимо, чтобы реагирующие вещества - горючее и кислород – были доведены до температуры воспламенения, т. е. до температуры, при которой может происходить реакция горения.

При расчёте горения топлива определяют количество расходуемого при сжигании воздуха, количество и состав образующихся продуктов горения.

Эти расчёты выполняются по данным элементарного состава топлива на основе уравнений горения.

Теоретически необходимый расход воздуха для сжигания каменного угля:

$$L_0 = 0,089C + 0,267H + 0,033(S - O) \text{ м}^3/\text{кг}$$

Практически для полного сгорания топлива требуется подвод воздуха в количестве, превышающем теоретически необходимое, так как трудно добиться идеального смешения воздуха с топливом. Отношение практически введённого топлива к теоретически необходимому носит название коэффициента избытка воздуха:

$$n = \frac{L_n}{L_0}$$

где  $L_n$  – практически введённое количество воздуха в  $\text{м}^3$

$L_0$  – теоретически необходимое количество воздуха  $\text{м}^3$

Чем хуже смешение воздуха с топливом, тем больший коэффициент избытка воздуха приходится принимать для полного его сжигания. Наиболее трудно добиться хорошего смешения при сжигании твёрдого топлива и легче при сжигании газообразного. Исходя из этого, коэффициент избытка воздуха при сжигании твёрдого топлива принимают  $n = 1,3-1,5$ , жидкого  $n = 1,1-1,15$  и газообразного  $n = 1,05-1,1$ .

Количество и состав продуктов горения топлива определяют, исходя из уравнений горения.

Объём уходящих газов для твёрдого топлива определяется по формуле:

$$V_0 = V_{\text{RO}_2} + V_{\text{N}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}}$$

$V_{\text{RO}_2}$  – объём трёхатомных газов;

$V_{\text{N}_2}$  – объём азота;

$V_{\text{H}_2\text{O}}$  – объём воды.

Или используют формулу:

$$V_0 = 0,224 \left[ C/12 + H/2 + W/18 + S/32 + N/28 + \left( C/12 + \frac{H - O/8}{4} + S/32 \right) 79/21 \right] \text{ м}^3/\text{кг}$$

При расчёте объёма уходящих газов для газообразного топлива используют формулу:

$$V_0 = [\text{CO}_2 + \text{CO} + 3\text{CH}_4 + 4\text{C}_2\text{H}_4 + 3\text{C}_2\text{H}_2 + \text{H}_2 + 2\text{H}_2\text{S} + \text{N}_2 + W + 79/21(\text{CO}/2 + 2\text{CH}_4 + 3\text{C}_2\text{H}_4 + 3/2 \text{H}_2\text{S} + \text{H}_2/2 + 5/2 \text{C}_2\text{H}_2 - \text{O}_2)] 0,01 \text{ м}^3/\text{м}^3$$

Расход топлива для тепловых агрегатов рассчитывают по формуле:

$$B = Q_{\text{пп}} / Q_1, \text{ где } Q_{\text{пп}} = G[(i_{\text{пп}} - i_{\text{пв}}) + (P/100)(i_{\text{кв}} - i_{\text{пв}})],$$

$G$  – количество необходимого пара кг/сек.

$i_{\text{пп}}$ ,  $i_{\text{пв}}$ ,  $i_{\text{кв}}$  – энтальпия перегретого пара, питательной и котловой воды,

$Q_1$  – количество тепла, полезно использованное в котлоагрегате.

к.п.д, котельной установки определяется как:

$$\eta = 100 Q_1 / Q_{\text{п}}$$

В связи с тем, что расчёт горения топлива по элементарному составу трудоёмок и зачастую при проведении теплотехнических расчётов отсутствует полный анализ, обычно пользуются формулами приближённого расчёта горения, приведённые в таблице 1.

Таблица 1.1

Определённая величина	Размерность	Формула
Теоретическое количество воздуха, необходимое для сгорания 1 кг твёрдого топлива $L_o$ .	$\text{м}^3/\text{кг}$	$\frac{1,01}{4187} Q_{н}^p + 0,5$
Теоретическое количество воздуха, необходимое для сгорания 1 кг жидкого топлива $L_o$	$\text{м}^3/\text{кг}$	$\frac{0,85}{4187} Q_{н}^p + 2$
Теоретическое количество воздуха, необходимое для сгорания 1 $\text{м}^3$ газообразного топлива $L_o$ , при $Q_{н}^p < 16750 \text{кДж}/\text{м}^3$	$\text{м}^3/\text{м}^3$	$\frac{0,875}{4187} Q_{н}^p$
Теоретическое количество воздуха, необходимое для сгорания 1 $\text{м}^3$ газообразного топлива $L_o$ , при $Q_{н}^p > 16750 \text{кДж}/\text{м}^3$	$\text{м}^3/\text{м}^3$	$\frac{1,09}{4187} Q_{н}^p - 0,25$
Теоретическое количество продуктов сгорания, от 1 кг твёрдого топлива $V_o$ .	$\text{м}^3/\text{кг}$	$\frac{0,89}{4187} Q_{н}^p + 1,65$
Теоретическое количество продуктов сгорания, от 1 кг жидкого топлива $V_o$ .	$\text{м}^3/\text{кг}$	$\frac{1,11}{4187} Q_{н}^p$
Теоретическое количество продуктов сгорания, от 1 $\text{м}^3$ газообразного топлива $V_o$ , с $Q_{н}^p < 16750 \text{кДж}/\text{м}^3$	$\text{м}^3/\text{м}^3$	$\frac{0,725}{4187} Q_{н}^p + 1$
Теоретическое количество продуктов сгорания, от 1 $\text{м}^3$ газообразного топлива $V_o$ , с $Q_{н}^p > 16750 \text{кДж}/\text{м}^3$	$\text{м}^3/\text{м}^3$	$\frac{1,14}{4187} Q_{н}^p + 0,25$

**Задача 1.**

Объём - 2 часа

В топке котла сжигается уголь;  $C^p$ ,  $H^p$ ,  $S^p$ ,  $N^p$ ,  $O^p$ ,  $A^p$ ,  $W^p$ .

Коэффициент избытка воздуха за котлоагрегатом  $\alpha_{ух}$ . Температура уходящих газов на выходе из последнего газохода  $t_{ух.г}$ . Температура воздуха в котельной  $t_k$ . Объёмные теплоёмкости воздуха  $c'_{рв} = 1,297 \text{кДж}/(\text{м}^3\text{К})$ , уходящих газов  $c'_{рух} = 1,415 \text{кДж}/(\text{м}^3\text{К})$

Температура питательной воды  $t_{пв} = 150^\circ\text{C}$ . Величина непрерывной продувки

$P = 4\%$ . Потери тепла от механической неполноты сгорания  $q_{п} = 4\%$ .

Составить тепловой баланс и определить КПД котельной установки на 1 кг. топлива. Рассчитать расход угля котельной установкой для производства  $G$  т/ч. перегретого пара с параметрами  $P_{пн}$ ,  $t_{пн}$ .

Исходные данные в табл.1.1.

Таблица 1.1

№ вар.	Состав топлива							$\alpha_{yx}$	$t_{yx,r}$ °C	$t_k$ °C	$P_{пн}$ Мпа	$t_{пн}$ °C	$G$ т/ч.
	$C^p$	$H^p$	$S^p$	$N^p$	$O^p$	$A^p$	$W^p$						
1	63,8	1,2	1,7	0,6	1,3	22,9	8,5	1,5	170	20	1,4	280	10
2	52,4	2,6	2,1	1,0	2,1	30,2	9,6	1,3	150	22	1,2	250	10
3	70,1	1,5	1,8	0,3	1,2	10,1	15,0	1,2	120	23	1,3	300	15
4	65,4	1,7	1,9	0,2	1,3	21,1	8,4	1,0	130	24	1,4	320	15
5	58,3	1,8	1,5	1,0	1,4	32,0	4,0	1,1	160	25	1,2	340	10
6	52,8	1,1	1,4	1,1	1,5	33,1	9,0	1,3	120	26	1,0	350	5
7	71,2	1,4	1,3	1,2	1,6	10,4	12,9	1,2	180	27	1,0	300	10
8	80,0	1,3	1,1	0,2	1,7	11,5	4,2	1,5	200	28	1,1	280	20
9	49,8	2,0	1,0	1,8	1,8	28,3	17,0	1,8	210	29	1,2	270	10
10	56,1	2,1	2,0	0,8	1,9	31,0	6,1	2,0	180	30	1,3	250	15
11	68,0	2,2	2,1	1,1	2,0	20,5	4,1	0,9	170	25	1,4	250	20
12	79,1	2,3	2,2	1,4	2,1	10,1	2,8	1,1	180	20	1,4	270	5
13	72,4	2,4	2,3	1,6	2,2	10,4	8,7	1,0	120	22	1,4	280	4
14	53,2	2,5	2,4	1,8	2,3	20,8	7,0	1,1	170	24	1,0	300	8
15	58,1	2,6	2,5	1,5	2,4	30,6	2,3	1,2	130	26	1,0	250	10
16	55,6	2,7	2,6	2,0	2,5	28,5	6,1	1,5	140	27	1,0	300	15
17	62,8	2,8	2,7	2,1	2,6	10,4	16,6	1,7	150	20	1,2	300	10
18	64,9	3,0	2,8	1,8	2,7	20,8	4,0	1,6	120	30	1,3	280	15
19	59,1	3,1	3,0	1,7	2,8	21,7	8,6	1,9	130	25	1,6	280	20
20	68,3	3,2	3,2	1,6	2,9	12,8	8,0	1,8	140	26	1,2	280	8
21	65,6	3,4	3,5	0,2	1,0	19,7	6,6	2,0	150	27	1,4	270	10

### Задача 2

Объём -1 час

Цель – определение теплоты сгорания топлива.

Условие задачи.

Определить теплоту сгорания угля состава:  $W^p = 4,5\%$ ,  $A^p = 9,0\%$ ,  $S^p = 4,1\%$ ,  $O^p = 5,5\%$ ,  $N^p = 1,6\%$ ,  $H^p = 4,2\%$ ,  $C^p = 71,1\%$

### Задача 3.

Объём -1 час

Цель – определение состава и вида топлива.

Условие задачи.

Определить состав рабочего топлива по следующим данным:

$C^o = 80\%$ ;  $O^o = 9\%$ ;  $A^c = 10\%$

### Задача 4.

Объём -1 час.

Цель – определение теплоты сгорания твёрдого топлива.

Условие задачи.

Определить низшую теплоту сгорания каменного угля следующего состава:

$C^p = 80\%$ ;  $H^p = 6,0\%$ ;  $O^p = 3,0\%$ ;  $S^p = 1,0\%$ ;  $A^p = 6,0\%$ ;  $W^p = 4,0\%$

### Задача 5

Объём -1 час.

Цель – определение теплоты сгорания газообразного топлива.

Условие задачи.

Определить низшую теплоту сгорания газа, содержащего 20% CO<sub>2</sub>; 6,0% CO; 60% H<sub>2</sub>; 23% CH<sub>4</sub>; 9,0% N<sub>2</sub>

### Задача 6.

Объём -1 час.

Цель – определение количества воздуха для сгорания природного газа и объём продуктов сгорания.

Определить количество воздуха, необходимое для сгорания природного газа с

$Q_p^p = 35600$  кДж/м<sup>3</sup> и объём продуктов горения при коэффициенте избытка воздуха –  $n = 1,05$

## 2. Тема – техническая термодинамика и теплотехника

При решении задач с 6 по 12 необходимо взять за основу уравнения состояния идеального газа.

Закон Бойля-Мариотта  $PV = const$ ,

Закон Гей-Люссака  $v_1/v_2 = T_1/T_2$

Закон Шарля  $p_1/p_2 = T_1/T_2$

Используя законы Гей-Люссака и Бойля-Мариотта, получаем уравнение состояния идеального газа или уравнение Менделеева – Клайперона;

$$PV = RT,$$

где  $R$  – удельная газовая постоянная.

Студент должен знать первое и второе начало термодинамики, определение энтропии и энтальпии, термодинамические процессы изменения состояния идеального газа, процесс парообразования.

Изохорный процесс.

Соотношение параметров для процесса:  $p_1/p_2 = T_1/T_2$ .

Теплота процесса:  $q_v = c_v(T_2 - T_1)$

Если  $T_2 > T_1$ , то процесс положительный, происходит подвод тепла.

Если  $T_2 < T_1$ , то процесс отрицательный, происходит отвод тепла.

Изменение энтропии:  $s_2 - s_1 = c_v \ln T_2/T_1$ ,

$c_v$  – средняя изохорная удельная теплоёмкость в интервале температур от  $T_2$  до  $T_1$ .

Работа процесса. Воспользуемся основным законом термодинамики обозначив  $dq$  через  $dq_v$

$$dq_v = du + pdv,$$

но при  $v = const$ ,  $dv = 0$  и  $pdv = 0$ , в результате уравнение примет вид

$$dq_v = du,$$

т. е при изохорном процессе работа не совершается, а всё тепло расходуется на изменение внутренней энергии.

Изотермический процесс

Уравнения процесса:  $T = const$ .

Соотношение параметров.  $p_1/p_2 = v_2/v_1$

Теплота процесса.  $dq_T = pdv$

т. е всё подведённое количество удельной теплоты при изотермическом процессе расходуется на совершение внешней механической работы.

Изменение энтропии.  $s_2 - s_1 = R \ln v_2/v_1$ .

Работа процесса.  $w = RT \ln v_2/v_1$ ,

или  $w = RT \ln p_1/p_2$

Исходя из уравнения состояния газа

$$p_1 v_1 = p_2 v_2 = RT \quad \text{получим}$$

$$w = p_1 v_1 \ln v_2/v_1 = p_2 v_2 \ln v_2/v_1.$$

Выразим удельную работу через удельную энтропию. Т.к.  $dq = Tds$ , то интегрируя получим

$$\int_{s_1}^{s_2} T ds = \int_{v_1}^{v_2} p dv = w;$$

Т. к. процесс изотермический, то  $T$  можно вынести за знак интеграла и в результате получим:

$$w = T \int_{s_1}^{s_2} ds = T (s_2 - s_1).$$

Удельная работа при изотермическом расширении или сжатии равна произведению температуры процесса на изменение удельной энтропии.

Изобарный процесс.

Уравнение процесса:  $p = const$ .

Соотношение параметров:  $p_1 v_1 = RT_1$ ; и  $p_1 v_2 = RT_2$

Теплота процесса:  $q_p = c_p(T_2 - T_1)$

$c_p$  – изобарная удельная теплоёмкость в интервале температур  $T_2$  и  $T_1$ .

Изменение энтропии:  $s_2 - s_1 = c_p \ln T_2/T_1$ .

Работа процесса. Удельная работа при изобарном процессе определяется как

$$w = p(v_2 - v_1)$$

$$w = R(T_2 - T_1).$$

Адиабатный процесс.

При адиабатном изменении состояния газа допускают, что к нему не подводят и от него не отводят тепло.

Уравнение процесса.  $dq = 0$ , а следовательно,  $ds = dq/T = 0$ . Поэтому удельная энтропия системы остаётся постоянной и уравнение процесса имеет вид

$$s = const$$

Соотношение параметров. При адиабатном процессе все три параметра входящие в уравнение Клайперона переменны.

или

$$pv^k = const$$

$$p_1/p_2 = (v_2/v_1)^k$$

$$T_1/T_2 = (v_2/v_1)^{k-1}$$

$$T_1/T_2 = (p_1/p_2)^{(k-1)/k}$$

Теплота процесса. Адиабатный процесс протекает без подвода и отвода тепла, т. е при  $dq = 0$ .

Применительно к адиабатному процессу уравнение первого начала имеет вид

$$du + pdv = 0$$

$$du = - pdv$$

При адиабатном сжатии затраченная внешняя удельная работа идёт на увеличение внутренней удельной энергии газа (давление и температура повышаются).

Работа процесса:  $w = 1/(k-1)(p_1 v_1 - p_2 v_2)$

Политропный процесс

Уравнение процесса. В действительных процессах происходит изменение всех параметров. Кривые, описывающие реальные процессы называют политропными. Их уравнение имеет вид

$$pv^n = const$$

где  $n$  – постоянная для данного процесса величина, называется показателем политропы.

*Соотношение параметров.* Так как уравнение политропны аналогично уравнению адиабаты, то, заменив показатель адиабаты на показатель политропны, получим уравнения:

$$\begin{aligned} p_2/p_1 &= (v_1/v_2)^n \\ T_2/T_1 &= (p_2/p_1)^{(n-1)/n} \\ T_2/T_1 &= (v_1/v_2)^{(n-1)} \end{aligned}$$

*Теплота процесса.* Количество удельной теплоты при политропном процессе

$$dq = c_n dT$$

Удельная теплоёмкость определяется формулой  $c_n = c_v(n - k)/(n - 1)$

*Работа процесса.* Выражение для удельной работы можно получить из уравнений

$$\begin{aligned} w &= [R/(n - 1)] (T_1 - T_2); \\ w &= [1/(n - 1)] (p_1 v_1 - p_2 v_2); \end{aligned}$$

Для определения параметров водяного пара студент должен уметь пользоваться диаграммами  $pv$ ,  $ts$  и  $is$ .

При решении задач 13,14,15 необходимо изучить основы теплопередачи.

Необходимым и достаточным условием теплообмена является разность температур. Тепло передаётся тремя способами: теплопроводностью, конвекцией и излучением.

*Теплопроводность* – процесс распространения тепловой энергии в твёрдом теле при непосредственном соприкосновении отдельных частиц тела, имеющих различные температуры.

Общее количество тепла  $Q$  в джоулях, переданное через площадь поверхности плоской стенки за время  $\tau$  определяется как:

$$Q = qA\tau = (\lambda/\delta)\Delta tA\tau \quad (2.1)$$

где  $A$ - площадь поверхности.

В практике большое значение имеет процесс передачи тепла через плоскую стенку, состоящую из нескольких слоёв материала с различной теплопроводностью.

Толщины слоёв обозначены как  $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ , а теплопроводность каждого материала  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  соответственно. Известны также температуры наружных поверхностей  $t_1$  и  $t_4$ . Температуры  $t_2$  и  $t_3$  - температура на границе между слоями неизвестны.

В этом случае плотность теплового потока  $q$ , проходящего через каждый слой стенки, по значению постоянна и для всех слоёв одинакова, но на своём пути она преодолевает местное термическое сопротивление  $(\delta/\lambda)$ .

Поэтому для каждого слоя имеем:

$$q = (t_1 - t_2)/(\delta_1/\lambda_1); \quad q = (t_2 - t_3)/(\delta_2/\lambda_2); \quad q = (t_3 - t_4)/(\delta_3/\lambda_3),$$

Из этих равенств можно определить  $q$

$$\begin{aligned} t_1 - t_2 &= q \delta_1/\lambda_1; \\ t_2 - t_3 &= q \delta_2/\lambda_2; \\ t_3 - t_4 &= q \delta_3/\lambda_3 \end{aligned} \quad (2.2.)$$

Складывая, левые и правые части равенства получим:

$$t_1 - t_4 = q(\delta_1/\lambda_1 + \delta_2/\lambda_2 + \delta_3/\lambda_3)$$

или

$$q = \frac{t_1 - t_4}{(\delta_1/\lambda_1 + \delta_2/\lambda_2 + \delta_3/\lambda_3)}, \quad (2.3.)$$

По формулам (2.2.) и (2.3.) можно определить значения неизвестных  $t_2$  и  $t_3$ ;

$$\begin{aligned} t_2 &= t_1 - q\delta_1/\lambda_1; \\ t_3 &= t_2 - q\delta_2/\lambda_2 = t_1 - q(\delta_1/\lambda_1 + \delta_2/\lambda_2) \text{ или} \\ t_3 &= t_4 + q\delta_3/\lambda_3 \end{aligned} \quad (2.4.)$$

*Конвекция* – процесс переноса энергии при перемещении жидкости или газа из области с одной температурой в область, имеющую другую температуру

Главной задачей теории конвективной теплоотдачи является определение теплового потока  $\Phi$ , который проходит через поверхность твёрдого тела, омываемого потоком. При практических расчётах пользуются законом Ньютона:

$$\Phi = \alpha A (t_{жс} - t_{см}), \quad (2.5)$$

где:  $t_{жс}$  – температура среды;

$t_{см}$  – температура поверхности стенки;

$A$  – площадь поверхности;

$\Phi$  – тепловой поток.

Коэффициент пропорциональности  $\alpha$ , учитывающий конкретные условия теплообмена между жидкостью и поверхностью тела, называют коэффициентом теплоотдачи.

При  $A = 1 \text{ м}^2$ , плотность теплового потока  $q$  равна:

$$q = \alpha (t_{жс} - t_{см}) \quad (2.6)$$

или

$$q = \frac{(t_{жс} - t_{см})}{1/\alpha}$$

Величину  $1/\alpha$  называют, термическим сопротивлением теплоотдачи. Решив уравнение (2.6) относительно коэффициента теплоотдачи, получим

$$\alpha = q / (t_{жс} - t_{см}).$$

Единица измерения  $\alpha$  – Вт/(м<sup>2</sup>\* °С) или Вт/(м<sup>2</sup>\* К).

*Излучение (лучистый теплообмен).* Все тела обладает свойствами теплового излучения и каждое из них излучает энергию в окружающее пространство. Тепловые лучи, поглощённые другим телом, преобразуются в энергию хаотического теплового движения атомов и молекул и повышают температуру тела. Таким образом, теплообмен излучением осуществляется в результате двойного взаимного превращения энергии: тепловая – лучистая - тепловая. Интенсивность излучения повышается с повышением температуры излучающих тел.

$$\Phi = Q/\tau \quad (2.7.)$$

Единица измерения потока – ватт (Вт).

Поверхностной плотностью  $q$  потока излучения называют отношение потока излучения к площади поверхности и измеряется в Вт/м<sup>2</sup>

$$q = \Phi/A$$

Из всего потока излучения  $\Phi$ , падающего на поверхность тела, часть  $\Phi_A$  поглощается телом, часть  $\Phi_R$  отражается от него, а часть  $\Phi_D$  пропускается сквозь тело, т. е.

$$\Phi = \Phi_A + \Phi_R + \Phi_D$$

Поделим обе части уравнения на  $\Phi$

$$\Phi_A/\Phi + \Phi_R/\Phi + \Phi_D/\Phi = 1 \quad (2.8)$$

Обозначим:

$\Phi_A/\Phi = A$  – поглощательная способность тела;

$\Phi_R/\Phi = R$  – отражательная способность тела;

$\Phi_D/\Phi = D$  – пропускательная способность тела;

Учитывая равенство (2.8) получим:

$$A + R + D = 1$$

Если угол падения равен углу отражения, тело называют зеркальным. Если же излучение отражается во все направления, то поверхность тела называют абсолютно белым. Если  $D = 1$  (при  $A = R = 0$ ), то тело пропускает всё падающее излучение и называется абсолютно прозрачным или диатермичным. Все одно и двухатомные газы можно считать диатермичными телами. В противоположность им трёхатомные и многоатомные газы поглощают и излучают тепловую энергию.

В реальных условиях абсолютно чёрных, белых и прозрачных тел не существует. Для всех реальных тел коэффициенты  $A$ ,  $R$ ,  $D$  всегда меньше единицы.

Реальные тела обладают лишь той или иной степенью черноты, белизны и прозрачности.

Тело, спектральная поглощательная способность которого не зависит от длины волны падающего излучения, называют серым. Цвет тела определяется способностью поглощать и отражать свет с различными длинами волн.

*Закон Кирхгофа.* При термодинамическом равновесии отношение излучательной способности тела к его поглощательной способности не зависит от природы тела, а является одинаковой для всех тел функцией температуры и равно излучательной способности абсолютно чёрного тела при той же температуре.

$$\Phi_1/A_1 = \Phi_2/A_2 = \dots = \Phi_0/A_0 = \Phi_0 = f(T) \quad (2.9.)$$

где  $\Phi_0$  и  $A_0$  - излучательные и поглощательные способности абсолютно чёрного тела, а аналогичные величины  $\Phi_1, A_1, \Phi_2, A_2$  соответственно относятся к первому, второму и т. д. телам.

*Закон Стефана – Больцмана.* Поток излучения абсолютно чёрного тела прямо пропорционален четвёртой степени его температуры.

$$\Phi_0 = \sigma_0 T^4$$

где  $\sigma_0 = 5,7 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К}^4)$  – константа излучения абсолютно чёрного тела.

Обычно это уравнение записывают так

$$\Phi_0 = C_0 (T/100)^4$$

где  $C_0 = 5,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К}^4)$  – постоянная излучения абсолютно чёрного тела.

Закон Стефана – Больцмана применим также и для серых тел. У серых тел, так же как и у чёрных, излучательная способность пропорциональна абсолютной температуре в четвёртой степени:

$$\Phi = C (T/100)^4$$

$C$  – коэффициент излучения серого тела,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \text{ К}^4)$  – определяется природой, температурой, состоянием поверхности тела и всегда меньше  $C_0$ .

Отношение коэффициента излучения серого тела к постоянной излучения абсолютно чёрного тела при той же температуре называется степенью черноты и обозначается  $\varepsilon$ :

$$\varepsilon = C/C_0,$$

Так как  $C_0 > C$ , то всегда степень черноты серого тела  $\varepsilon < 1$ .

### Задача 7

Объём -1 час

Найти массу, изменения энтропии и конечную температуру кислорода, содержащегося в сосуде ёмкостью  $V_1$ , при абсолютном давлении  $P_1$  и температуре  $t_1$ . Определить также количество теплоты, которое нужно подвести, чтобы повысить давление (при  $V = \text{const}$ ) до  $P_2$ . Удельная теплоёмкость зависит от температуры (определяется по справочникам).

Таблица 2.1.

№ варианта.	$V_1$ (л)	$P_1$ (кПа)	$P_2$ (кПа)	$t_1$ (°C)	№ варианта	$V_1$ (л)	$P_1$ (кПа)	$P_2$ (кПа)	$t_1$ (°C)
1	50	300	1000	32	11	400	980	3800	24
2	64	360	1200	44	12	520	1100	5300	31
3	200	420	1800	45	13	70	180	1800	43
4	180	700	2500	47	14	200	340	2300	52
5	300	900	3000	43	15	130	250	1700	45
6	340	920	4050	36	16	120	400	1500	34
7	80	300	900	34	17	80	400	1700	47
8	190	450	2500	51	18	60	300	1620	49
9	240	370	2400	18	19	360	1100	3420	39
10	600	1200	4200	36	20	410	1200	4300	42

### Задача 8

Объём -1 час

Для двигателей внутреннего сгорания с изохорно – изобарным подводом теплоты определить параметры всех узловых точек цикла, количество подведенной и отведенной теплоты, работу цикла и теоретический КПД цикла. Начальное давление, температура,  $\varepsilon$  – степень сжатия,  $\rho$  – степень изобарного расширения,  $\lambda$  – степень увеличения давления на участке подвода теплоты,  $n_1$  и  $n_2$  – показатели политропы заданы. Рабочее тело воздух, масса 1 кг, теплоёмкость рабочего тела принять постоянной. Исходные данные в таблице 2.2.

Таблица 2.2.

№ Вар.	$n_1$	$n_2$	$\varepsilon$	$\lambda$	$\delta$	$P_1$	$t_1$
1	1,4	1,20	1,4	1,7	10	85	17
2	1,38	1,20	1,5	1,6	10	98	37
3	1,36	1,20	1,6	1,5	11	95	27
4	1,34	1,20	1,7	1,4	11,5	90	22
5	1,32	1,20	1,8	1,3	12,0	80	32
6	1,30	1,20	1,4	1,7	10,0	82	32
7	1,40	1,22	1,5	1,6	10,0	86	32
8	1,38	1,22	1,6	1,5	11,0	80	17
9	1,36	1,22	1,7	1,4	11,5	95	22
10	1,34	1,22	1,8	1,3	12,0	98	27
11	1,32	1,22	1,4	1,7	10,0	96	27
12	1,30	1,22	1,5	1,6	10,5	94	32
13	1,40	1,24	1,6	1,5	11,0	92	32
14	1,38	1,24	1,7	1,4	11,5	85	22
15	1,36	1,24	1,8	1,3	12,0	88	37
16	1,34	1,24	1,4	1,7	10,0	90	17
17	1,32	1,24	1,5	1,6	10,5	86	37
18	1,30	1,24	1,6	1,5	11,0	95	22
19	1,40	1,26	1,7	1,4	11,5	78	15
20	1,38	1,26	1,8	1,3	12,0	80	25

### Задача 9

Объём -1 час

Определить количества тепла, проходящего в 1 час через  $1 \text{ м}^2$  плоской стенки толщиной  $S = 345 \text{ мм}$ , выложенной из шамотного кирпича. Температура внутренней поверхности стенки  $t_1 = 1250 \text{ °C}$ , наружной  $t_2 = 150 \text{ °C}$

### Задача 10

Объём -2 час

Стальная труба теплоснабжения покрыта слоем теплоизоляции с теплопроводностью  $\lambda_{\text{из}}$  и толщиной  $\delta_{\text{из}}$ . Найти суточную потерю теплоты с 1 м длины изолированного трубопровода и определить, во сколько раз при наличии изоляции потеря теплоты меньше, чем при неизолированном трубопроводе. Определить температуру наружной поверхности теплоизоляции. При расчёте принять следующие исходные данные: коэффициент теплопроводности стали  $\lambda_{\text{ст}}=50 \text{ Вт/(м К)}$ , коэффициенты теплоотдачи от горячей воды к стенке  $\alpha_1=200 \text{ Вт/(м}^2 \text{ К)}$  и от стенки к окружающей среде  $\alpha_2=10 \text{ Вт/(м}^2 \text{ К)}$ . Диаметры трубопровода  $d_{1\text{тр}}$  и  $d_{2\text{тр}}$ , температуру горячей воды  $t_{\text{г.в.}}$ , температуру окружающей среды  $t_{\text{ср}}$ , коэффициент теплопроводности  $\lambda_{\text{из}}$  и толщину  $\delta_{\text{из}}$  принять из таблицы 2.3.

Таблица 2.3.

№ вар.	$\lambda_{из}$	$\delta_{из}$	$t_{cp}$	$t_{г.в}$	$d_{1гр}$	$d_{2гр}$
1	0,07	60	10	100	60	64
2	0,06	70	19	110	80	85
3	0,05	80	20	120	85	90
4	0,04	50	25	130	75	80
5	0,08	70	17	140	57	60
6	0,07	80	12	150	42	50
7	0,05	20	10	90	86	92
8	0,003	10	24	70	88	94
9	0,035	50	15	110	100	110
10	0,028	40	13	120	102	112
11	0,056	50	14	130	130	132
12	0,066	70	12	140	148	160
13	0,075	57	10	150	180	200
14	0,024	60	18	90	203	223
15	0,013	40	20	100	225	241
16	0,01	30	21	110	250	260
17	0,018	50	10	120	255	272
18	0,012	30	5	140	300	230
19	0,038	40	8	150	250	260
20	0,052	39	6	130	250	258

**Задача 11**

Объём -1 час

Рассчитать и выбрать оборудование для калориферной установки, приточной системы вентиляции. Производительность вентилятора  $G$ , м<sup>3</sup>/сек, температура наружного воздуха  $t_n = -50^\circ\text{C}$  ниже нуля, температура воздуха после калориферов  $t_k = 16^\circ\text{C}$ . Параметры теплоносителя – горячая вода на входе  $t_v = 95^\circ\text{C}$ , на выходе  $t''_v$  – расчётная.

Производительность вентилятора принимать из табл.2.4.

Таблица 2.4.

№вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$G, \text{м}^3/\text{сек}$	100	120	150	200	250	300	320	140	80	60

Продолжение табл.3

11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
90	220	230	240	210	260	270	280	290	310	130

**Задача 12**

Объём -1 час

В цилиндре под поршнем находится  $M$  кг. воздуха, занимающего объём  $V_1 = 0,1 \text{ м}^3$ , при избыточном давлении  $P'_{изб} = 49,035 \text{ кПа}$ . К поршню приложена сила, сжимающая воздух до избыточного давления  $P'_{изб} = 0,588 \text{ МПа}$  при  $t = \text{const}$ . Определить конечный объём  $V_2$ .

**Задача 13**

Объём -1 час

Газ находится в цилиндре под избыточным давлением  $P'_{изб} = 98,07 \text{ кПа}$ ; барометрическое давление равно  $73,327 \text{ кПа}$ . При изотермическом расширении газ увеличил свой объём в 3 раза. Определить абсолютное давление  $P$  газа в цилиндре после его расширения.

**Задача 14**

Объём -1 час

Избыточное давление кислорода, находящегося в баллоне снизилось с 10,2 до 1,96 Мпа. Определить во сколько раз изменилось плотность кислорода, если процесс протекал при  $t = \text{const}$ .

#### Задача 15

Объём -1 час

Определить плотность воздуха при 0 °С и атмосферном давлении 77,42 кПа, если при стандартных условиях плотность воздуха  $\rho = 1,293 \text{ кг/м}^3$

#### Задача 16

Объём -1 час

В произвольном цикле телу сообщено 2500 Дж. теплоты и при этом получена полезная работа в количестве 780 Дж. Определить технический КПД цикла.

#### Контрольные вопросы

1. Виды и классификация топлива
2. Химический состав твёрдого, жидкого и газообразного топлива.
3. Тепловые эффекты реакции горения
4. Горение жидкого топлива
5. Горение твёрдого топлива
6. Горение газообразного топлива
7. Что такое детонация?
8. Что такое рабочее тело и параметры его состояния?
9. Выведите уравнение идеального газа?
10. Выведите уравнение реального газа?
11. Что такое смесь?
12. Как определить теплоёмкость газа и газовой смеси ?
13. Сущность первого закона термодинамики?
14. Что такое энтальпия и энтропия?
15. Условия, необходимые для обеспечения обратного процесса.
16. Основные условия для получения цикла Карно
17. Изобразите термодинамические процессы на P-V и H-S диаграммах.
18. Сущность второго закона термодинамики.
19. Какую закономерность раскрывает цикл Карно?
20. Изобразите процесс парообразования на H-S диаграмме.
21. Изобразите принципиальную схему паросиловой установки, работающей по циклу Ренкина, и отобразите цикл её работы в координатах P-V и H-S.
22. Перечислите способы повышения экономичности паросилового цикла.
23. Что такое ДВС?
24. Что такое индикаторное давление и индикаторная мощность? Как определить индикаторную мощность, индикаторный к.п.д. и эффективный к.п.д.?
25. Что такое конвекция и конвективный теплообмен? Как определить коэффициент теплоотдачи?
26. Что такое теплопередача? Способы передачи теплоты. Что такое температурное поле, температурный градиент и тепловой поток?
27. Напишите закон Фурье. Уравнение теплопроводности однослойной и многослойной стенки. Уравнение теплопроводности для цилиндрической стенки.
28. Что такое ламинарное и турбулентное движение? Что такое свободное и вынужденное движение?
29. Факторы, вызывающие теплообмен излучением. Как определить поток излучения? Закон Кирхгофа. Закон Стефана –Больцмана. Как определить степень черноты?
30. Как определить теплосодержание пара?
31. Как определить работу пара в адиабатном процессе на диаграммах?

32. Как определить термический К,П,Д, цикла Ренкина и чему он равен?
33. Чем отличается цикл Карно от цикла Ренкина?
34. Каковы преимущества противоточного движения теплоносителей перед прямоточной
35. Основные положения Инструкции по охране труда и технике безопасности при работе на тепловых агрегатах.
36. Каковы условия допуска к работе. Характеристика опасных и вредных производственных факторов.
37. Правила хранения горючих веществ и материалов.
38. Характеристика опасных и вредных производственных факторов.
39. Основные положения Инструкции по пожарной безопасности на участках оснащённых тепловыми агрегатами.
40. Средства пожаротушения. Требования по обеспечению пожаро - и взрывобезопасности.
41. Обязанности сотрудников перед началом работы. Обязанности сотрудников во время работы. Обязанности сотрудников по окончании работы
42. Порядок совместных действий сотрудников и подразделений пожарной охраны при пожаре.

## **Литература**

### Основная литература

1. Плужников С, Брюханов О. Основы гидравлики и теплотехники.Изд. Академия, ISBN 978-5-7695-7778-9, 2011, 240 с.
2. Брюханов О. Н, Коробко В.И, Мелик — Аракелян А. Т. Основы гидравлики и теплотехники.Изд. Академия, 2008, 240 с.
3. Амерханов Р.А. Теплопередача. Учебное пособие. Изд. КТГУ, 2008 г.
4. Круглова Е, Булгакова Р, Круглов Г. Теплотехника. Учебник для ВУЗов, Изд-во «Лань», 2010 г,208 с.
5. Кирилин В.А. Техническая термодинамика. Издательский дом МЭИ, 2008. 496 с.
6. Смирнов М.В. Теоретические основы теплотехники. Изд. Ин-Фомо, 2010.
7. Цветков Ф.Ф, Керимов Р.В, Величко Б.И. Задачник по тепломассообмену. 3-е издание. 2009.
8. Шатров М.Г., Камфер Г.М., Теплотехника, Высшая школа, 2003-67(1)с.
9. Л. Д. Гинзбург, М. З. Зарипов, 2-е изд., Энергоатомиздат, 1990-223(1)с. Справочное пособие по технике безопасности.
10. .Правила пожарной безопасности для энергетических предприятий. 2009.144 с. ISBN 5-93630-710-2

### 12.2 Дополнительная литература

1. Г.А. Зисман, О.М. Годес, Курс общей физики, ч.1. Механика. Основы термодинамики, физики реальных газов, жидкостей и твёрдого тела, Учебное пособие, Киев, Днипро 1994г
2. Трофимова Т.И. Курс общей физики, Учебное пособие для вузов, 18-е изд, М – Академия, 2010 -557(3)с