1 ГАЗОВЫЕ СМЕСИ И ТЕПЛОЕМКОСТИ

1.1 Методические указания

В инженерной практике часто приходится иметь дело с газообразными веществами, близкими по свойствам к идеальным газам и представляющими собой механическую смесь отдельных компонентов различных газов, химически не реагирующих между собой. Это так называемые газовые смеси.

Основным законом, определяющим поведение газовой смеси, является *закон Дальтона*: полное давление смеси идеальных газов равно сумме парциальных давлений всех входящих в неё компонентов

$$p = \sum_{1}^{n} p_i .$$

Состав газовой смеси определяется количеством каждого из газов, входящих в смесь, и может быть задан массовыми или объёмными долями. Массовая доля определяется отношением массы отдельного газа входящего в смесь, к массе всей смеси

$$g_i = \frac{m_i}{m},$$

где g_i – массовая доля компонента смеси;
m_i – массы отдельных газов, *кг;*
m – масса всей смеси, *кг*.

Объёмной долей газа называется отношение объёма каждого компонента, входящего в смесь, к объёму всей газовой смеси при условии, что объём каждого компонента, отнесён к давлению и температуре смеси

$$r_i = \frac{V_i}{V},$$

где r_i – объёмная доля компонента смеси;
V_i – приведённые объёмы компонентов газов, входящих в смесь, *м*^{3};
V – общий объём газовой смеси, *м*^{3}.

Очевидно, что $m = \sum_{1}^{n} m_i = 1$, $g = \sum_{1}^{n} g_i = 1$.

Основные формулы, применяемые при расчётах газовых смесей, приведены в таблице 1.1.1.

Таблица 1.1.1 – Формулы для расчёта газовых смесей

Состав смеси	Перевод из одного состава в другой	Удельный объём смеси	Кажущаяся молекулярная масса смеси	Газовая постоянная смеси	Парциальное давление
Массовые доли	$r_i = \dfrac{\frac{g_i}{\mu_i}}{\sum_{i=1}^{n} \frac{g_i}{\mu_i}}$	$v_{см} = \sum_{i=1}^{n} \frac{g_i}{\rho_i}$	$\mu_{см} = \dfrac{1}{\sum_{i=1}^{n} \frac{g_i}{\mu_i}}$	$R_{см} = \sum_{i=1}^{n} g_i R_i$	$P_i = g_i \frac{R_i}{R_{см}} P_{см}$
Объёмные доли	$g_i = \dfrac{r_i \mu_i}{\sum_{i=1}^{n} r_i \mu_i}$	$v_{см} = \frac{1}{r_i \rho_i}$	$\mu_{см} = \sum_{i=1}^{n} r_i \mu_i$	$R_{см} = \dfrac{8314}{\sum_{i=1}^{n} r_i \mu_i}$	$P_i = r_i P_{см}$

Теплоемкостью называют количество теплоты, которое необходимо сообщить телу (газу), чтобы повысить температуру какой-либо количественной единицы на 1^0C. В зависимости от выбранной количественной единицы вещества различают удельные мольную μC, *кДж/(кмоль·К)*, массовую C, *кДж/(кг·К)* и объемную C', *кДж/(м*^{3}*·К)* теплоемкости.

1 $м^3$ газа в зависимости от параметров его состояния имеет разные массы. В связи с этим объемную теплоемкость всегда относят к массе газа, заключенной в 1 $м^3$ его при нормальных условиях $P_н$ = 101325 *Па* (760 *мм.рт.ст.*) и T = 273 *К* (t =0^0C). Для определения значений перечисленных выше теплоёмкостей достаточно знать величину одной какой-либо из них. Удобнее всего иметь величину мольной теплоемкости. Тогда массовая теплоемкость $C = \frac{\mu C}{\mu}$, а объемная теплоемкость $C' = \frac{\mu C}{22{,}4}$. Объемная и массовая теплоемкости связаны между собой зависимостью $C' = C\rho_н$, где $\rho_н$ - плотность газа при нормальных условиях.

Теплоемкость газа зависит от его температуры. По этому признаку различают среднюю и истинную теплоемкость. Если q - количество теплоты, сообщаемой единице количества газа (или отнимаемого от него) при изменении температуры газа от t_1 до t_2 то средняя теплоемкость в пределах температур $C_m = \frac{q}{t_2 - t_1}$. Предел этого отношения, когда разность температур стремится к нулю, называют истинной теплоемкостью. Аналитически последняя определяется, как $C = \frac{dq}{dt}$. Теплоемкость идеальных газов зависит не только от их температуры, но и от их атомности и характера процесса. Теплоемкость реальных газов зависит от их природных свойств, характера процесса, температуры и давления. Для газов важное значение имеют следующие два случая нагревания (охлаждения): 1) изменение состояния при постоянном объеме; 2) изменение состояния при постоянном давлении. Обоим этим случаям соответствуют различные значения теплоемкостей. Таким образом, различают истинную и среднюю теплоемкости: а) мольную при постоянном объеме μC_v, $\mu C_{v\,m}$ и постоянном давлении μC_p, $\mu C_{p\,m}$; *б)* массовую при постоянном объеме C_v, $C_{v\,m}$ и постоянном давлении C_p, $C_{p\,m}$; в) объемную при постоянном объеме C'_v, $C'_{v\,m}$ и постоянном давлении C'_p, $C'_{p\,m}$.

Между мольными теплоемкостями при p=const и v=const существует следующая зависимость: $\mu C_p - \mu C_v = \mu R = 8{,}314$ *кДж/(кмоль·К)*.

Для приближённых расчётов при невысоких температурах можно принять значения мольных теплоёмкостей указанные в таблице 1.1.2.

Отношение теплоёмкостей при p=const и v=const обозначается $k = \frac{C_p}{C_v}$.

Таблица 1.1.2 – Значения мольных теплоёмкостей при p=const и v=const

Газы	Мольная теплоёмкость		$k=\frac{C_p}{C_v}$
	$\mu C_v, \frac{кДж}{(кмоль \cdot К)}$	$\mu C_p, \frac{кДж}{(кмоль \cdot К)}$	
Одноатомные	12,56	20,93	1,67
Двухатомные	20,93	29,31	1,41
Трёх и многоатомные	29,31	37,68	1,29

$$C_v = \frac{R}{k-1};\ C_p = \frac{k}{k-1}R.$$

Количество теплоты, которое участвует в процессе нагревания (охлаждения) M, *кг* или V, $м^3$ газа

$$Q_v = M(C_{v\ m2}t_2 - C_{v\ m1}t_1) = V_н(C'_{v\ m2}t_2 - C'_{v\ m1}t_1),$$

$$Q_p = M(C_{p\ m2}t_2 - C_{p\ m1}t_1) = V_н(C'_{p\ m2}t_2 - C'_{p\ m1}t_1).$$

Теплоёмкость газов изменяется с изменением температуры, причём эта зависимость носит криволинейный характер. Нелинейную зависимость истинной теплоёмкости от температуры представляют в виде

$$C = a + bt + dt^2,$$

где a, b, d – величины постоянные для данного газа.

В расчётах нелинейную зависимость заменяют близкой к ней линейной зависимостью $C = a + bt$, а средняя теплоёмкость при изменении температуры от t_1 до t_2

$$C_m = a + \frac{b}{2}(t_1 + t_2).$$

Для средней теплоёмкости в пределах 0^0-t эта формула принимает вид

$$C_m = a + \frac{b}{2}t.$$

Теплоёмкость смеси идеальных газов

Если смесь газов задана массовыми долями, то её массовая теплоёмкость определяется как сумма произведений массовых долей на массовую теплоёмкость каждого компонента $C_{v\ см} = \sum_{i=1}^{n} g_i C_{v\ i}$, $C_{p\ см} = \sum_{i=1}^{n} g_i C_{p\ i}$.

При задании смеси объёмными долями объёмная теплоёмкость смеси $C'_{v\ см} = \sum_{i=1}^{n} r_i C'_{v\ i}$, $C'_{p\ см} = \sum_{i=1}^{n} r_i C'_{p\ i}$.

Аналогично мольная теплоёмкость смеси равна сумме произведений объёмных долей на мольные теплоёмкости составляющих смесь газов $\mu C_{v\ см} = \sum_{i=1}^{n} r_i \mu C_{v\ i}$, $\mu C_{p\ см} = \sum_{i=1}^{n} r_i \mu C_{p\ i}$.

В приложениях 2-9 приведены теплоёмкости наиболее часто встречающихся в расчётах газов.

1.2 Задание №1

Газовая смесь задана в массовых g_i или объемных r_i долях процентным составом компонентов смеси; давление смеси $P_{см}$, *МПа*, объём смеси $V_{см}$, $м^3$ температура смеси $t_{см}$,^0C (таблица 1.2.1).

Определить:

1. Состав смеси (если по условию состав смеси задан в объемных долях r_i, то следует определить дополнительно состав смеси в массовых долях g_i и наоборот);
2. Газовые постоянные компонентов смеси R_i, *кДж/(кг·К)*;
3. Газовую постоянную смеси $R_{см}$, *кДж/(кг·К)* через объёмные и массовые доли;
4. Среднюю молярную массу смеси $\mu_{см}$, *кмоль/кг* через объемные r_i и массовые g_i доли;
5. Парциальные давления компонентов P_i,*МПа* через объемные r_i и массовые g_i доли;
6. Массу смеси $m_{см}$, *кг* и компонентов смеси m_i, *кг*;
7. Парциальные объёмы $V_i, м^3$, парциальные удельные объемы v_i, $м^3/кг$ и плотности ρ_i, $кг/м^3$ компонентов смеси;
8. Плотности компонентов ρ_i, $кг/м^3$ и смеси $\rho_{см}$, $кг/м^3$ при заданных условиях $P_{см}$, *МПа* и $t_{см}$,^0C;
9. Плотности компонентов ρ_i, $кг/м^3$ при нормальных физических условиях;
10. Плотность смеси $\rho_{см}$, $кг/м^3$ при нормальных физических условиях через объемные r_i и массовые g_i доли;
11. Истинную молярную μC, *кДж/(кмоль·К)*, объемную C', *кДж/*$(м^3$*·К)*, и массовую C, *кДж/(кг·К)* теплоемкости при p=const и v=const для температуры смеси $t_{см}$,, ^0C;
12. Среднюю молярную μC, *кДж/(кмоль·К)*, объемную C', *кДж/*$(м^3$*·К)* и массовую C, *кДж/(кг·К)* теплоемкости при p=const и v=const для интервала температур $\Delta t_{см}$,, ^0C ;
13. Количество теплоты, необходимое на нагревание (охлаждение) в интервале температур $\Delta t_{см}$,, ^0C при p=const и v=const количества вещества 2 *кмоль*, 5 $м^3$ и 7 *кг* смеси.

Таблица 1.2.1– Параметры газовой смеси

№ вар	Состав смеси							Давление смеси, $P_{см}$, *МПа*	Объём смеси, $V_{см}$, $м^3$	Температура смеси, $t_{см}$,, ^0C	Интервал температур, $\Delta t_{см}$,, ^0C
	CO_2	H_2	CO	N_2	H_2O	SO_2	O_2				
1	12	-	-	75	8	-	5	0,095	2	2000	200-1000
2	10	-	2	80	-	-	8	0,1	3	450	300-100
3	-	5	15	70	10	-	-	0,09	4	500	100-300
4	13	-	-	75	6	-	6	0,105	5	150	600-200
5	-	10	30	50	10	-	-	0,105	6	200	1000-100
6	5	30	10	55	-	-	-	0,085	7	350	900-200
7	14	-	-	77	5	-	4	0,07	8	400	700-500
8	-	5	20	75	-	-	-	0,095	9	100	500-200
9	-	-	-	60	15	10	15	0,1	10	300	800-300
10	15	-	-	76	4	-	5	0,105	2	600	600-100

Продолжение таблицы 1.2.1

№ вар	Состав смеси							Давление смеси, $P_{см}$, *МПа*	Объём смеси, $V_{см}$, $м^3$	Темпе-ратура смеси, $t_{см}$, ^0C	Интервал темпера-тур, $\Delta t_{см}$, ^0C
	CO_2	H_2	CO	N_2	H_2O	SO_2	O_2				
11	20	-	10	-	15	-	55	0,115	3	700	750-250
12	16	-	-	76	4	-	4	0,12	4	750	1000-500
13	8	5	2	85	-	-	-	0,125	5	700	300-1300
14	15	-	-	75	5	-	5	0,105	6	800	600-900
15	-	20	10	50	-	-	20	0,085	7	1000	100-400
16	18	-	1	65	-	16	-	0,12	8	1200	850-350
17	-	15	-	45	15	-	25	0,10	9	1000	350-750
18	14	-	-	76	6	-	4	0,09	10	2000	900-600
19	-	2	25	65	-	8	-	0,1	2	450	450-300
20	-	10	-	70	-	15	5	0,105	3	350	300-150
21	10	-	-	75	5	-	10	0,105	4	600	800-300
22	-	5	10	80	-	-	5	0,1	5	550	400-300
23	17	-	-	74	5	-	4	0,095	6	400	800-300
24	10	10	20	60	-	-	-	0,115	7	1000	650-150
25	-	2	28	55	-	15	-	0,085	8	1000	150-1200
26	15	-	-	47	7	-	31	0,1	9	800	300-800
27	-	17	40	13	-	30	-	0,1	10	300	1200-1000
28	12	-	-	75	5	-	8	0,09	2	500	400-900
29	-	8	15	62	-	15	-	0,095	3	1000	800-600
30	10	-	-	80	5	-	5	0,1	4	600	600-100
31	10	-	77	-	9	-	4	0,11	3	700	500-1000
32	-	5	15	80	-	-	-	0,10	7	200	500-200
33	-	-	-	55	15	15	15	0,085	9	250	800-250
34	17	-	-	45	5	-	33	0,10	10	700	200-700
35	-	13	-	66	-	16	5	0,095	5	400	400-100

1.3 Пример решения задания

Смесь имеет следующий объемный состав:

CO_2=12%; $r_{CO_2}=0{,}12$; H_2O=8%; $r_{H_2O}=0{,}08$;

N_2=75%; $r_{N_2}=0{,}75$; O_2 =5%; $r_{O_2}=0{,}05$.

Всего 100%; $\sum_{i=1}^{4} r_i = 1{,}0$.

Объем смеси $V_{см}$=3 $м^3$; давление смеси $P_{см}$ =0,1МПа; температура смеси $t_{см}$=100 ^0C ($T_{см}$=373 *К*). Температуру, при которой определяется истинная теплоемкость смеси t=2000^0C (T=2273 *К*) Интервал температур, для которого определяется средняя теплоемкость смеси t_1=200^0C (T_1=473*К*); t_2=1000^0C (T_2=1273*К*). Провести расчет в соответствии с заданием (п. 1.2)

Решение

1. Определяем состав смеси в массовых долях

$$g_i = \frac{r_i \mu_i}{\sum_{i=1}^{n} r_i \mu_i},$$

где μC – молярная масса компонента смеси, *кг/кмоль* (приложение 1).

$$g_{CO_2} = \frac{r_{CO_2}\mu_{CO_2}}{r_{CO_2}\mu_{CO_2} + r_{N_2}\mu_{N_2} + r_{H_2O}\mu_{H_2O} + r_{O_2}\mu_{O_2}};$$

$$g_{CO_2} = \frac{0{,}12 \cdot 44}{0{,}12 \cdot 44 + 0{,}75 \cdot 28 + 0{,}08 \cdot 18 + 0{,}05 \cdot 32} = \frac{5{,}28}{29{,}32} = 0{,}180.$$

Аналогично для остальных компонентов смеси

$$g_{N_2} = \frac{0{,}75 \cdot 28}{29{,}32} = 0{,}716; \quad g_{H_2O} = \frac{0{,}08 \cdot 18}{29{,}32} = 0{,}049; \quad g_{O_2} = \frac{0{,}05 \cdot 32}{29{,}32} = 0{,}055.$$

Проверка $\sum_{i=1}^{n} g_i = g_{CO_2} + g_{N_2} + g_{O_2} + g_{H_2O} = 0{,}180 + 0{,}716 + 0{,}055 + 0{,}049 = 1{,}000.$

2. Определяем газовые постоянные компонентов смеси

$$R_i = \frac{8{,}314}{\mu_i}, \frac{кДж}{(кг \cdot К)}$$

$$R_{CO_2} = \frac{8{,}314}{\mu_{CO_2}} = \frac{8{,}314}{44} = 0{,}189 \frac{кДж}{(кг \cdot К)}; \quad R_{H_2O} = \frac{8{,}314}{\mu_{H_2O}} = \frac{8{,}314}{18} = 0{,}462 \frac{кДж}{(кг \cdot К)};$$

$$R_{N_2} = \frac{8{,}314}{\mu_{N_2}} = \frac{8{,}314}{28} = 0{,}297 \frac{кДж}{(кг \cdot К)}; \quad R_{O_2} = \frac{8{,}314}{\mu_{O_2}} = \frac{8{,}314}{32} = 0{,}260 \frac{кДж}{(кг \cdot К)}.$$

3. Определяем газовую постоянную смеси:

а) через объёмные r_i доли

$$R_{см} = \frac{8314}{\sum r_i \mu_i} = \frac{8314}{r_{CO_2}\mu_{CO_2} + r_{N_2}\mu_{N_2} + r_{H_2O}\mu_{H_2O} + r_{O_2}\mu_{O_2}};$$

$$R_{см} = \frac{8{,}314}{0{,}12 \cdot 44 + 0{,}75 \cdot 28 + 0{,}08 \cdot 18 + 0{,}05 \cdot 32} = \frac{8{,}314}{29{,}32} = 0{,}284 \frac{кДж}{(кг \cdot К)}.$$

б) через массовые g_i доли

$$R_{см} = \sum_{i=1}^{4} g_i R_i, \frac{кДж}{(кг \cdot К)};$$

$$R_{см} = g_{CO_2} R_{CO_2} + g_{N_2} R_{N_2} + g_{H_2O} R_{H_2O} + g_{O_2} R_{O_2};$$

$$R_{см} = 0{,}180 \cdot 0{,}189 + 0{,}716 \cdot 0{,}297 + 0{,}049 \cdot 0{,}462 + 0{,}055 \cdot 0{,}260 = 0{,}284 \frac{кДж}{(кг \cdot К)}.$$

4. Находим среднюю молярную массу смеси

а) через объёмные r_i доли

$$\mu_{см} = \sum_{i=1}^{n} r_i \mu_i = r_{CO_2}\mu_{CO_2} + r_{N_2}\mu_{N_2} + r_{H_2O}\mu_{H_2O} + r_{O_2}\mu_{O_2}, \frac{кг}{кмоль};$$

$$\mu_{см} = 0{,}12 \cdot 44 + 0{,}75 \cdot 28 + 0{,}08 \cdot 18 + 0{,}050 \cdot 32 = 29{,}32 \frac{кг}{кмоль}.$$

б) через массовые g_i доли

$$\mu_{см} = \frac{1}{\sum_{i=1}^{n} \frac{g_i}{\mu_i}} = \frac{1}{\left(\frac{g_{CO_2}}{\mu_{CO_2}} + \frac{g_{N_2}}{\mu_{CO_2}} + \frac{g_{H_2O}}{\mu_{H_2O}} + \frac{g_{O_2}}{\mu_{O_2}}\right)}, \frac{кг}{кмоль};$$

$$\mu_{см} = \frac{1}{\left(\frac{0{,}18}{44} + \frac{0{,}716}{28} + \frac{0{,}049}{18} + \frac{0{,}055}{32}\right)} = \frac{1}{0{,}03413} = 29{,}32\frac{кг}{кмоль}.$$

Проверка $\mu_{см} = \frac{8{,}314}{R_{см}} = \frac{0{,}314}{0{,}284} = 29{,}32\frac{кг}{кмоль}.$

5. Определяем парциальные давления компонентов смеси:

а) через объёмные r_i доли

$P_i = P_{см} r_i, МПа;$

$P_{CO_2} = 0{,}1 \cdot 0{,}12 = 0{,}012 МПа;$ $\qquad$ $P_{H_2O} = 0{,}1 \cdot 0{,}08 = 0{,}008 МПа;$

$P_{N_2} = 0{,}1 \cdot 0{,}75 = 0{,}075 МПа;$ $\qquad$ $P_{O_2} = 0{,}1 \cdot 0{,}05 = 0{,}005 МПа;$

б) через массовые g_i доли

$$P_i = \frac{P_{см} g_i R_i}{R_{см}}, МПа;$$

$$P_{CO_2} = \frac{0{,}1 \cdot 0{,}18 \cdot 0{,}189}{0{,}284} = 0{,}012 МПа; \quad P_{H_2O} = \frac{0{,}1 \cdot 0{,}049 \cdot 0{,}462}{0{,}284} = 0{,}008 МПа;$$

$$P_{N_2} = \frac{0{,}1 \cdot 0{,}716 \cdot 0{,}297}{0{,}284} = 0{,}075 МПа; \quad P_{O_2} = \frac{0{,}1 \cdot 0{,}055 \cdot 0{,}260}{0{,}284} = 0{,}005 МПа;$$

Проверка $P_{см} = \sum_{i=1}^{n} P_i = 0{,}012 + 0{,}075 + 0{,}008 + 0{,}005 = 0{,}1 МПа.$

6. Находим массу смеси

$$m_{см} = \frac{P_{см} V_{см}}{R_{см} T_{см}} = \frac{0{,}1 \cdot 10^6 \cdot 3}{0{,}284 \cdot 10^3 \cdot 373} = 2{,}83 кг.$$

Определяем массу компонентов газовой смеси

$m_i = m_{см} g_i, кг$

$m_{CO_2} = 2{,}83 \cdot 0{,}18 = 0{,}51 кг;$ $\qquad$ $m_{H_2O} = 2{,}83 \cdot 0{,}049 = 0{,}139 кг;$

$m_{N_2} = 2{,}83 \cdot 0{,}715 = 2{,}025 кг;$ $\qquad$ $m_{O_2} = 2{,}83 \cdot 0{,}055 = 0{,}156 кг;$

Проверка $m_{см} = \sum_{i=1}^{n} m_i = 0{,}51 + 2{,}025 + 0{,}139 + 0{,}156 = 2{,}83 кг.$

7. Определяем парциальные объемы компонентов смеси

$V_i = r_i V_{см}, м^3;$

$V_{CO_2} = 0{,}12 \cdot 3 = 0{,}36 м^3;$ $\qquad$ $V_{H_2O} = 0{,}08 \cdot 3 = 0{,}24 м^3;$

$V_{N_2} = 0{,}75 \cdot 3 = 2{,}25 м^3;$ $\qquad$ $V_{O_2} = 0{,}05 \cdot 3 = 0{,}15 м^3;$

Проверка $V_{см} = \sum_{i=1}^{n} V_i = 0{,}36 + 2{,}25 + 0{,}24 + 0{,}15 = 3{,}00 м^3.$

Парциальные удельные объемы компонентов смеси

$$v_i = \frac{V_i}{m_i}, \frac{м^3}{кг},$$

где V_i, m_i - парциальный объём и масса конкретного газа

$$v_{CO_2} = \frac{0,36}{0,51} = 0,706\,\frac{м^3}{кг}; \qquad v_{H_2O} = \frac{0,24}{0,139} = 1,727\,\frac{м^3}{кг};$$

$$v_{N_2} = \frac{2,25}{2,025} = 1,111\,\frac{м^3}{кг}; \qquad v_{O_2} = \frac{0,15}{0,156} = 0,962\,\frac{м^3}{кг};$$

Находим плотности компонентов смеси

$$\rho_i = \frac{1}{v_i}, \frac{кг}{м^3};$$

$$\rho_{CO_2} = \frac{1}{0,706} = 1,42\,\frac{кг}{м^3}; \qquad \rho_{H_2O} = \frac{1}{1,727} = 0,58\,\frac{кг}{м^3};$$

$$\rho_{N_2} = \frac{1}{1,111} = 0,90\,\frac{кг}{м^3}; \qquad \rho_{O_2} = \frac{1}{0,962} = 1,040\,\frac{кг}{м^3};$$

8. Плотности компонентов и смеси при заданных условиях $P_{см}$ и $t_{см}$

$$\rho_i = \frac{P_{см}}{R_i T_{см}}, \frac{кг}{м^3};$$

$$\rho_{CO_2} = \frac{0,1\cdot 10^6}{189\cdot 373} = 1,42\,\frac{кг}{м^3}; \qquad \rho_{H_2O} = \frac{0,1\cdot 10^6}{462\cdot 373} = 0,58\,\frac{кг}{м^3};$$

$$\rho_{N_2} = \frac{0,1\cdot 10^6}{297\cdot 373} = 0,90\,\frac{кг}{м^3}; \qquad \rho_{O_2} = \frac{0,1\cdot 10^6}{260\cdot 373} = 1,04\,\frac{кг}{м^3};$$

$$\rho_{см} = \frac{P_{см}}{R_{см} T_{см}}, \frac{кг}{м^3}; \qquad \rho_{см} = \frac{0,1\cdot 10^6}{284\cdot 373} = 0,944\,\frac{кг}{м^3}.$$

9. Определяем плотности компонентов смеси при нормальных физических условиях НФУ ($P_{см}^{н.у.} = 101325\,Па,\ T_{см}^{н.у.} = 273,15\,К$)

$$\rho_i^{н.у.} = \frac{P_{см}^{н.у.}}{R_i T_{см}^{н.у.}}, \frac{кг}{м^3};$$

$$\rho_{co_2}^{н.у.} = \frac{101325}{189\cdot 273,15} = 1,970\,\frac{кг}{м^3}; \qquad \rho_{H_2O}^{н.у.} = \frac{101325}{462\cdot 273,15} = 0,804\,\frac{кг}{м^3};$$

$$\rho_{N_2}^{н.у.} = \frac{101325}{297\cdot 273,15} = 1,250\,\frac{кг}{м^3}; \qquad \rho_{O_2}^{н.у.} = \frac{101325}{260\cdot 273,15} = 1,429\,\frac{кг}{м^3};$$

10. Определяем плотность смеси при НФУ:

а) через объемные r_i доли

$$\rho_{см}^{н.у.} = \sum_{i=1}^{n} r_i \rho_i^{н.у.}, \frac{кг}{м^3};$$

$$\rho_{см}^{н.у.} = 0,12\cdot 1,970 + 0,75\cdot 1,250 + 0,08\cdot 0,804 + 0,05\cdot 1,429 = 1,310\,\frac{кг}{м^3}.$$

б) через массовые g_i доли

$$\rho_{см}^{н.у.} = \frac{1}{\sum\limits_{i=1}^{n} \frac{g_i}{\rho_i^{н.у.}}} = \frac{1}{\frac{0,180}{1,970} + \frac{0,716}{1,250} + \frac{0,049}{0,804} + \frac{0,055}{1,429}} = 1,310\,\frac{кг}{м^3}.$$

11. Находим истинную теплоемкость смеси (при $t_{см}$=2000^0C)

а) молярная теплоёмкость смеси при p=const

$$\mu C_{p\ см} = \sum_{i=1}^{n} r_i \mu C_{p\ i}, \frac{кДж}{(кмоль \cdot K)},$$

где $\mu C_{p\ i}$ - молярная изобарная теплоёмкость компонента при температуре смеси $t_{см}$, (приложения 2-9).

$$\mu C_{p\ см} = r_{CO_2} \mu C_{p\ CO_2} + r_{N_2} \mu C_{p\ N_2} + r_{H_2O} \mu C_{p\ H_2O} + r_{O_2} \mu C_{p\ O_2};$$

$$\mu C_{p\ см} = 0{,}12 \cdot 60{,}654 + 0{,}75 \cdot 36{,}377 + 0{,}08 \cdot 52{,}930 + 0{,}05 \cdot 38{,}406 = 37{,}1 \frac{кДж}{(кмоль \cdot K)};$$

молярная теплоёмкость смеси при v=const

$$\mu C_{v\ см} = \mu C_{p\ см} - 8{,}314 \frac{кДж}{(кмоль \cdot K)}; \qquad \mu C_{v\ см} = 37{,}1 - 8{,}314 = 28{,}786 \frac{кДж}{(кмоль \cdot K)}.$$

б) объемная теплоёмкость смеси при p=const и v=const

$$C'_{p\ см} = \frac{\mu C_{p\ см}}{22{,}4} = \frac{37{,}1}{22{,}4} = 1{,}67 \frac{кДж}{(м^3 \cdot K)}; \quad C'_{v\ см} = \frac{\mu C_{v\ см}}{22{,}4} = \frac{28{,}786}{22{,}4} = 1{,}28 \frac{кДж}{(м^3 \cdot K)};$$

в) массовая теплоёмкость смеси при p=const и v=const

$$C_{p\ см} = \frac{\mu C_{p\ см}}{\mu_{см}} = \frac{37{,}1}{29{,}32} \frac{кДж}{(кг \cdot K)}; \qquad C_{v\ см} = \frac{\mu C_{v\ см}}{\mu_{см}} = \frac{28{,}786}{29{,}32} = 0{,}98 \frac{кДж}{(кг \cdot K)};$$

12. Определяем среднюю теплоемкость смеси в интервале температур $\Delta t_{см} = 200 \div 1000^0 C$

а) средняя молярная теплоёмкость смеси при p=const

$$\mu C_{pm\ см}\Big|_{t_1}^{t_2} = \frac{(\mu C_{pm\ см}\Big|_0^{t_2} t_2 - \mu C_{pm\ см}\Big|_0^{t_1} t_1)}{(t_2 - t_1)}, \frac{кДж}{(кг \cdot K)}$$

где $\mu C_{pm\ см}\Big|_0^{t_2} = \sum_{i=1}^{4} r_i \cdot \mu C_{pm\ i}\Big|_0^{t_2}$ - средняя молярная теплоёмкость смеси при p=const в интервале температур $0 \div t_2$;

$\mu C_{pm\ i}\Big|_0^{t_2}$ средняя молярная теплоёмкость компонента смеси при p=const в интервале температур $0 \div t_2 = 0 \div 1000^0 C$ согласно заданию из приложений 2-9.

$$\mu C_{pm\ см}\Big|_0^{1000} = r_{CO_2} \cdot \mu C_{pm\ CO_2}\Big|_0^{1000} + r_{N_2} \cdot \mu C_{pm\ N_2}\Big|_0^{1000} + r_{H_2O} \cdot \mu C_{pm\ H_2O}\Big|_0^{1000} +$$

$$+ r_{O_2} \cdot \mu C_{pm\ O_2}\Big|_0^{1000} \frac{кДж}{(кмоль \cdot K)};$$

$$\mu C_{pm\ см}\Big|_0^{1000} = 0{,}12 \cdot 49{,}392 + 0{,}75 \cdot 31{,}313 + 0{,}08 \cdot 38{,}619 + 0{,}05 \cdot 33{,}118 =$$

$$= 34{,}16 \frac{кДж}{(кмоль \cdot K)};$$

Аналогично находим среднюю молярную теплоёмкость смеси при p=const в интервале температур $0 \div t_1 = 0 \div 200^0 C$

$$\mu C_{pm\ см}\Big|_0^{200} = r_{CO_2} \cdot \mu C_{p\ CO_2}\Big|_0^{200} + r_{N_2} \cdot \mu C_{p\ N_2}\Big|_0^{200} + r_{H_2O} \cdot \mu C_{p\ H_2O}\Big|_0^{200} + r_{O_2} \cdot \mu C_{p\ O_2}\Big|_0^{200};$$

$$\mu C_{pm\ см}\Big|_0^{200} = 0{,}12 \cdot 41{,}077 + 0{,}75 \cdot 22{,}998 + 0{,}08 \cdot 30{,}304 + 0{,}05 \cdot 24{,}803 =$$

$$= 25{,}84 \frac{кДж}{(кмоль \cdot К)};$$

$$\mu C_{p\ см}\Big|_{t_1}^{t_2} = \frac{34{,}16 \cdot 1000 - 25{,}84 \cdot 200}{1000 - 200} = 36{,}24 \frac{кДж}{(кг \cdot К)}.$$

Средняя молярная теплоёмкость смеси при v=const

$$\mu C_{vm\ см}\Big|_{200}^{1000} = \mu C_{pm\ см}\Big|_{200}^{1000} - 8{,}314 = 36{,}24 - 8{,}314 = 27{,}93 \frac{кДж}{(кмоль \cdot К)}.$$

б) средняя объемная теплоёмкость при p=const

$$C'_{pm\ см}\Big|_{t_1}^{t_2} = \frac{\mu C_{pm\ см}\Big|_{t_1}^{t_2}}{22{,}4} = \frac{3624}{22{,}4} = 1{,}618 \frac{кДж}{(м^3 \cdot К)};$$

средняя объёмная теплоёмкость при v=const

$$C'_{vm\ см}\Big|_{t_1}^{t_2} = \frac{\mu C_{vm\ см}\Big|_{t_1}^{t_2}}{22{,}4} = \frac{25{,}84}{22{,}4} = 1{,}154 \frac{кДж}{(м^3 \cdot К)}.$$

в) средняя массовая теплоёмкость при p=const

$$C_{pm\ см}\Big|_{t_1}^{t_2} = \frac{\mu C_{pm\ см}\Big|_{t_1}^{t_2}}{\mu_{см}} = \frac{36{,}24}{29{,}32} = 1{,}236 \frac{кДж}{(кг \cdot К)};$$

массовая теплоёмкость при v=const

$$C_{vm\ см}\Big|_{t_1}^{t_2} = \frac{\mu C_{vm\ см}\Big|_{t_1}^{t_2}}{\mu_{см}} = \frac{25{,}84}{29{,}32} = 0{,}881 \frac{кДж}{(кг \cdot К)}.$$

11. Определяем количество теплоты, необходимое на нагревание (охлаждение) смеси при p=const:

а) 2 *кмоль* смеси

$$Q = 2\mu C_{pm\ см}\Big|_{t_1}^{t_2}(t_2 - t_1) = 2 \cdot 36{,}24(1000 - 200) = 57984 кДж;$$

б) 5 $м^3$ смеси

$$Q = 5C'_{pm\ см}\Big|_{t_1}^{t_2}(t_2 - t_1) = 5 \cdot 1{,}618(1000 - 200) = 6472 кДж;$$

в) 7 *кг* смеси

$$Q = 7C_{pm\ см}\Big|_{t_1}^{t_2}(t_2 - t_1) = 7 \cdot 1{,}236(1000 - 200) = 6922 кДж.$$

Количество теплоты, необходимое на нагревание смеси при v=const:

а) 2 *кмоль* смеси

$$Q = 2\mu C_{vm\ см}\Big|_{t_1}^{t_2}(t_2 - t_1) = 2 \cdot 27{,}93(1000 - 200) = 44688 кДж;$$

б) 5 *м*^{3} смеси

$$Q = 5C'_{vm\ см}\Big|_{t_1}^{t_2}(t_2 - t_1) = 5 \cdot 1{,}154(1000 - 200) = 4616 кДж;$$

в) 7 *кг* смеси

$$Q = 7C_{vm\ см}\Big|_{t_1}^{t_2}(t_2 - t_1) = 7 \cdot 0{,}881(1000 - 200) = 4934 кДж.$$

2 ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ЦИКЛЫ

2.1 Методические указания

Круговым процессом или циклом называется совокупность термодинамических процессов, в результате осуществления которых рабочее тело возвращается в исходное состояние. Работа кругового процесса изображается в диаграмме *P-v* площадью, заключённой внутри замкнутого контура цикла, причём работа положительна, если цикл совершается по часовой стрелке (прямой цикл), и отрицательна, если он совершается против часовой стрелки (обратный цикл). Степень совершенства процесса превращения теплоты в работу в круговых процессах характеризуется термическим КПД

$$\eta_t = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = \frac{l_0}{q_1}.$$

Цикл идеальной тепловой машины представляет собой *цикл Карно*. При его осуществлении предполагается использование горячего источника с постоянной температурой, т. е. фактически с бесконечной теплоемкостью. Цикл состоит из двух адиабат и двух изотерм. Количество подведённой теплоты

$$q_1 = RT_1 \ln\frac{v_2}{v_1}.$$

Количество отведённой теплоты

$$q_2 = RT_2 \ln\frac{v_3}{v_4}.$$

Термический КПД цикла

$$\eta_t = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1},$$

где T_1 и T_2 – температуры верхнего и нижнего источников теплоты.

Цикл с подводом теплоты при постоянном объёме состоит из двух адиабат и двух изохор.

Характеристиками цикла являются

- степень сжатия $\varepsilon = \dfrac{v_1}{v_2}$;

- степень повышения давления $\lambda = \dfrac{P_3}{P_2}$.

Количество подведенной теплоты

3 ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ

3.1 Методические указания

Теплопроводностью называется процесс распространения тепла путем непосредственного соприкосновения частиц с различной температурой.

3.1.1 Температурное поле, градиент температуры

Тепловое состояние тела характеризуется температурой. При наличии теплопроводности температура различных частей тела различна, но она непрерывно меняется от точки к точке.

В физике совокупность мгновенных значений некоторой величины во всех точках, рассматриваемого пространства называется полем этой величины. В данном случае рассматривается температурное поле (скалярное) и поле тепловых потоков (векторное).

Совокупность точек в температурном поле, имеющих одинаковые температуры, называется изотермическими поверхностями.

Изотермические поверхности не пересекаются и не могут обрываться внутри поля, они либо замыкаются в себе, либо обрываются на гранях поля. При стационарном тепловом режиме изотермические поверхности «закреплены» в пространстве.

Например, в стенках бесконечно длинной трубы, нагреваемой изнутри, изотермические поверхности круглые цилиндрические, коаксиальные с поверхностью трубы.

Интенсивность изменения температуры внутри тела в каком-либо направлении характеризуются густотой (плотностью) изотерм на некотором линейном отрезке ΔS. Это изменение плотности изотерм выражается как $\frac{\Delta t}{\Delta S}$. Сближая изотермы, в пределе имеем

$$\lim_{\Delta S \to 0} = \frac{\Delta t}{\Delta S} = \frac{dt}{dS}\ ,\ \frac{{}^0C}{м}.$$

Наиболее сильное изменение температуры получается в направлении нормали к изотермам.

Предел отношения изменения температуры Δt между соседними изотермами к расстоянию между ними нормали Δn называется температурным градиентом (*grad t*).

$$\lim \frac{\Delta t}{\Delta n} = \frac{dt}{dn} = grad\ t\ ,\ \frac{{}^0C}{м}.$$

В общем случае $t = f(x, y, z, \tau)$, (τ- время отсчета температуры).

Наиболее простым случаем является одномерное стационарное температурное поле, т.е. $t = f(x)$. При этом *grad t =dt/dx*.

Температурный градиент – векторная величина, характеризующая интенсивность распространения теплоты внутри тела.

Положительным направлением температурного градиента является направление в сторону возрастания температуры.

3.1.2 Основной закон теплопроводности

Необходимым условием распространения тепла является неравенство нулю температурного градиента, т.е. наличие разности температур. Связь между количеством тепла dQ, которое за время $d\tau$ проходит через элементарную площадку df, расположенную на изотермической поверхности, и величиной температурного градиента устанавливается основным уравнением теплопроводности или законом Фурье

$$dQ = -\lambda \cdot grad\ t \cdot df \cdot d\tau, кДж.$$

Множитель λ называется коэффициентом теплопроводности и определяется физическими свойствами среды. Он численно равен отнесённому к единице времени, единице поверхности и единице градиента, количеству тепла, которое проходит через изотермическую поверхность по нормали к ней. Коэффициент λ является физической характеристикой тела и служит мерой его способности проводить тепло путём теплопроводности. Величина коэффициента теплопроводности для каждого материала зависит от его плотности, влажности и температуры.

Для однородной стенки площадью F, $м^2$, приняв τ =1*ч*., количество тепла, передаваемого теплопроводностью, можно определить по формуле

$$Q = -\lambda F grad\ t, Вт.$$

Удельный тепловой поток

$$q = \frac{Q}{F} = -\lambda grad\ t, \frac{Вт}{м^2}.$$

3.1.3 Теплопроводность плоской стенки

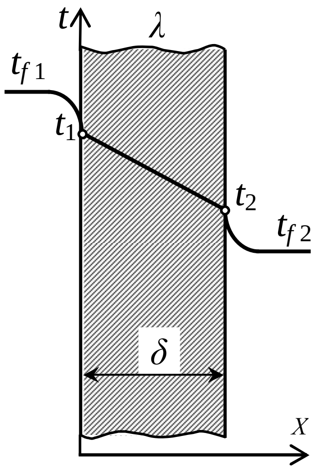

Рисунок 7 – Однородная плоская стенка

Рассмотрим однородную плоскую стенку толщиной δ (рисунок 7). Коэффициент теплопроводности будем считать постоянным и равным λ, *Вт*/(*м·К*), температура изменяется только в направлении оси *X*, температуры на поверхностях стенки равны t_1 и t_2 . В этом случае изотермические поверхности – плоскости перпендикулярные оси *X*.

Для слоя dx по закону Фурье $q = -\lambda \dfrac{dt}{dx}$,

Отсюда $dt = -\dfrac{q}{\lambda} dx$.

После интегрирования получим $t = -\dfrac{q}{\lambda} dx + C$.

Постоянная C определяется из условий x=0, t=t_1, $x = \delta$, t=t_2.

Тогда t_1=C и $t_2 = -\dfrac{q}{\lambda}\delta + t_1$,

отсюда $q = \dfrac{\lambda}{\delta}(t_1 - t_2), \dfrac{Вт}{м^2}$, где λ/δ – тепловая проводимость стенки;

Тогда можно записать $q = \dfrac{\Delta t}{\delta / \lambda}$,

где δ/λ – термическое сопротивление стенки.

График изменения температуры по толщине стенки представляет собой прямую линию.

3.1.4 Теплопроводность многослойной стенки

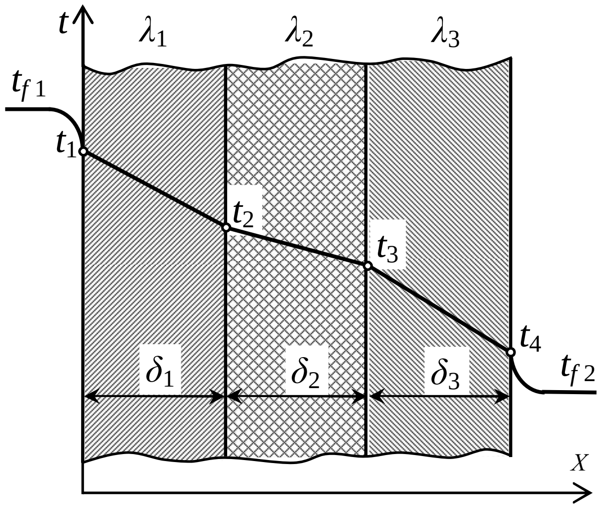

Рисунок 8 – Многослойная плоская стенка

Определим удельный тепловой поток многослойной (3-слойной) плоской стенки (рисунок 8). Известны δ_1, δ_2, δ_3, λ_1, λ_2, λ_3 и t_1, t_4.

При стационарном режиме удельный тепловой поток постоянен, поэтому для каждого слоя можно записать

$$q = \frac{\lambda_1}{\delta_1}(t_1 - t_2); \quad q = \frac{\lambda_2}{\delta_2}(t_2 - t_3);$$

$$q = \frac{\lambda_3}{\delta_3}(t_3 - t_4).$$

Из этих уравнений определяем разность температур в каждом слое

$$t_1 - t_2 = q\frac{\delta_1}{\lambda_1},\ t_2 - t_3 = q\frac{\delta_2}{\lambda_2},\ t_3 - t_4 = q\frac{\delta_3}{\lambda_3}.$$

Складывая, левые и правые части уравнений получим

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

Отсюда определяем значение удельного теплового потока в общем виде

$$q = \frac{t_1 - t_{n+1}}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \ldots + \frac{\delta_n}{\lambda_n}},\ \frac{Bm}{м^2}.$$

В знаменателе $\sum_1^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}$ - полное тепловое сопротивление стенки.

Для сравнения теплопроводностей однослойной и многослойной стенок вводят понятие об эквивалентном коэффициенте теплопроводности. Он равен коэффициенту теплопроводности однослойной пластины, толщина и тепловое сопротивление которой равны толщине и тепловому сопротивлению многослойной пластины

$$\delta_{экв.} = \sum_1^n \delta_i,\ \frac{\delta_{экв.}}{\lambda_{экв.}} = \sum_1^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}, \qquad \text{отсюда}\ \lambda_{экв.} = \frac{\sum_1^n \delta_i}{\sum_1^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}}.$$

Из этой формулы следует, что $\lambda_{экв.}$ зависит не только от физических свойств слоев, но и от их толщины.

Зная удельный тепловой поток, можно определить температуры на стыке слоев

$$t_2 = t_1 - q\frac{\delta_1}{\lambda_1}, {}^0C \text{ и т.д.}$$

График изменения температуры по толщине многослойной стенки представляет собой ломаную кривую.

Температуры на стыке слоев нетрудно определить графически. Для этого в осях *t-x* в масштабе начертим многослойную стенку, толщина каждого слоя будет $\frac{\delta_i}{\lambda_i}$. Для каждого слоя $q = \frac{\Delta t}{\frac{\delta_i}{\lambda_i}} = tg\varphi.$

Поэтому для многослойной стенки

$$tg\varphi = \frac{t_1 - t_4}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3}} = q.$$

Искомые температуры t_2, t_3 будут получены пересечением наклонной линии, проведенной через точки t_1, t_4 с границами слоев стенки.

Многослойными стенками являются стены жилых домов (внутренняя штукатурка, кирпич, внешняя облицовка), обмуровка топок промышленных печей, стенка цилиндра двигателя, если она покрыта накипью, нагаром, также будет многослойной. При ничтожно малой толщине накипи или нагара влияние их может быть сильным из-за низких коэффициентов теплопроводностей.

3.2 Задание №3

Теплота газообразных продуктов горения топлива передается через стенку котла кипящей воде. Заданы граничные условия третьего рода:

Температура газов t_{f1}, ${}^0C$, воды t_{f2}, ${}^0C$; коэффициент теплоотдачи от газов к стенке α_1, *Вт*/(*м*^{2}·*К*), от стенки в к воде α_2, *Вт*/(*м*^{2}·*К*) (таблица 3.2.1).

Требуется определить термические сопротивления *R*, *Вт*/(*м*^{2}·*К*), коэффициенты теплопередачи *h*, *Вт*/(*м*^{2}·*К*)и количество теплоты *q*, *Дж*, передаваемое от газов к воде через 1 *м*^{2} поверхности стенки в секунду для следующих случаев:

а) стенка стальная, совершенно чистая, толщина δ_2, *мм* (таблица 3.2.1), $\lambda_2 = 50$ *Вт*/(*м*·*К*);

б) стенка стальная, со стороны воды покрыта слоем накипи толщиной δ_3, *мм* (таблица 3.2.1), $\lambda_3 = 2{,}0$ *Вт*/(*м*·*К*);

в) рассматривается случай «б», дополнительно условие: на поверхности накипи имеется слой масла толщиной δ_4= 1 *мм*, $\lambda_4 = 0{,}1$ *Вт*/(*м*·*К*) ;

г) рассматривается случай «в», дополнительное условие: со стороны газов стенка покрыта слоем сажи толщиной δ_1, *мм* (таблица 3.2.1), $\lambda_1 = 0{,}2$ *Вт*/(*м·К*) .

Приняв количество теплоты для случая «а» за 100 %, определить в процентах количество теплоты для остальных случаев.

Определить температуру всех слоев стенки расчётным способом и изобразить графически распределение температуры внутри плоской стенки для рассматриваемых случаев.

Таблица 3.2.1 – Исходные данные

№ варианта	t_{f1}, ^0C	t_{f2}, ^0C	α_1, $\frac{Вт}{(м^2К)}$	α_2, $\frac{Вт}{(м^2К)}$	δ_1, *мм*	δ_2, *мм*	δ_3, *мм*
1	1020	202	155	3550	1	16	10
2	1100	200	160	3000	2	14	5
3	1000	180	140	2500	1	12	4
4	900	160	130	2000	2	10	3
5	800	140	120	1500	1	8	2
6	850	150	60	1000	2	12	10
7	950	160	70	2000	1	14	9
8	1050	170	80	3000	2	16	8
9	1150	180	90	4000	1	18	7
10	1250	190	100	5000	2	20	6
11	900	225	50	1000	1	14	7
12	800	200	40	980	2	13	6
13	700	175	30	960	1	12	5
14	600	150	20	940	2	11	4
15	500	125	10	920	1	10	3
16	575	110	55	2200	2	22	8
17	675	120	50	2100	1	24	7
18	775	130	45	2000	2	26	6
19	875	140	40	1900	1	23	5
20	975	150	35	1800	2	30	4
21	1000	100	40	3000	1	10	2
22	900	125	50	4000	2	12	3
23	1050	135	60	3500	1	14	5
24	950	150	45	4500	2	16	6
25	800	200	55	2000	0,5	18	7
26	850	210	65	2100	1	20	5
27	975	175	42	3100	2	22	8
28	400	100	15	1000	0,5	10	5
29	500	120	20	1250	1	12	8
30	600	140	25	1500	1,5	15	4
31	300	135	22	1450	1,2	17	6
32	400	133	21	3500	1,1	15	2
33	300	128	25	4000	1,5	18	7
34	500	145	26	2500	1,4	17	4
35	600	133	22	2000	1,6	16	6

3.3 Пример решения задания

Теплота газообразных продуктов горения топлива передается через стальную стенку котла кипящей воде. Температура газов t_{f1}=1200^0C, воды t_{f2}=220^0C; коэффициент теплоотдачи от газов к стенке α_1=160 *Вт*/(*м*^{2}*К*), от стенки к воде α_2=3500 *Вт*/(*м*^{2}*К*), толщина стенки δ_2=16 *мм*, коэффициент теплопроводности стенки $\lambda_2 = 50$ *Вт*/(*м·К*); толщина накипи δ_3=10 *мм*, коэффициент теплопроводности накипи $\lambda_3 = 2{,}0$ *Вт*/(*м·К*); толщина слоя масла δ_4= 1 *мм*, коэффициент теплопроводности масла $\lambda_4 = 0{,}1$ *Вт*/(*м·К*); толщина слоя сажи δ_1=1 *мм*, коэффициент теплопроводности сажи $\lambda_1 = 0{,}2$ *Вт*/(*м·К*).

Выполним расчётные и графические работы в соответствии с заданием.

Решение

Рассмотрим случай «а» - стенка стальная, совершенно чистая (рисунок 9)

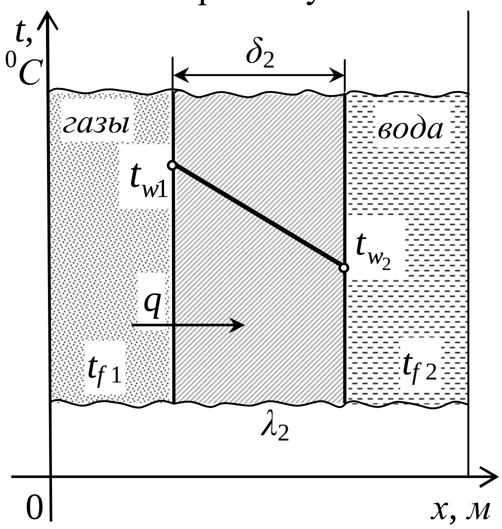

Рисунок 9 - Распределение температуры в плоской стенке (случай «а»)

Термическое сопротивление:

- от газов к стенке (тепловосприятию стенки)

$$R_1 = \frac{1}{\alpha_1} = \frac{1}{160} = 0{,}00625\frac{(м^2K)}{Вт};$$

- от стенки к кипящей воде (теплоотдачи стенки)

$$R_2 = \frac{1}{\alpha_2} = \frac{1}{3500} = 0{,}000285\frac{(м^2K)}{Вт};$$

- стальной стенки котла

$$R_3 = \frac{\delta_2}{\lambda_2} = \frac{0{,}016}{50} = 0{,}00032\frac{(м^2K)}{Вт};$$

Коэффициент теплопередачи чистой стальной стенки

$$h_a = \frac{1}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{1}{0{,}00625 + 0{,}000286 + 0{,}00032} = 146\frac{Вт}{(м^2K)};$$

Определяем количество теплоты

$$q_a = h_a(t_{f1} - t_{f2}) = 146(1200 - 220) = 143080\frac{Вт}{м^2}.$$

Находим температуру слоёв стенки

$$t_{w1} = t_{f1} - q_a R_1 = 1200 - 143080 \cdot 0{,}00625 = 305{,}75^0C;$$

$$t_{w_2} = t_{f1} - q_a(R_1 + R_3) = 1200 - 143080(0{,}00625 + 0{,}00032) = 259{,}96^0C.$$

Рассмотрим случай «б» - стенка стальная со стороны воды покрыта слоем накипи (рисунок 10)

Определяем термическое сопротивление (аналогично случаю «а»)

- от газов к стенке

$$R_1 = \frac{1}{\alpha_1} = \frac{1}{160} = 0{,}00625\frac{(м^2K)}{Вт};$$

- от стенки к кипящей воде

$$R_2 = \frac{1}{\alpha_2} = \frac{1}{3500} = 0{,}000285\frac{(м^2K)}{Вт};$$

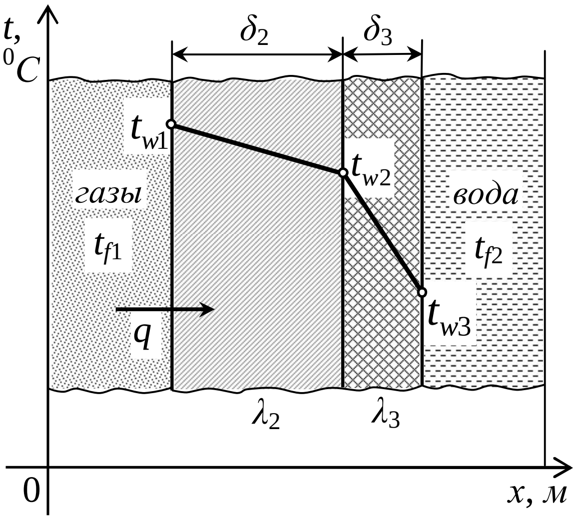

Рисунок 10 - Теплопроводность многослойной плоской стенки (случай «б»)

- стальной стенки котла

$$R_3 = \frac{\delta_2}{\lambda_2} = \frac{0{,}016}{50} = 0{,}00032 \frac{(м^2 К)}{Вт};$$

- слоя накипи

$$R_4 = \frac{\delta_3}{\lambda_3} = \frac{0{,}01}{2} = 0{,}005 \frac{(м^2 К)}{Вт};$$

Коэффициент теплопередачи стенки при наличии накипи со стороны воды

$$h_б = \frac{1}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4} =$$

$$= \frac{1}{0{,}00625 + 0{,}000286 + 0{,}00032 + 0{,}005} =$$

$$= 84{,}3 \frac{Вт}{(м^2 К)};$$

Определяем количество теплоты

$$q_б = h_б (t_{f1} - t_{f2}) = 84{,}3(1200 - 220) = 82614 \frac{Вт}{м^2}$$ или 57,7% от случая «а».

Рассчитываем температуру слоёв стенки

$$t_{w1} = t_{f1} - q_б R_1 = 1200 - 82614 \cdot 0{,}00625 = 683{,}66^0 C;$$

$$t_{w_2} = t_{f1} - q_б (R_1 + R_3) = 1200 - 82614(0{,}00625 + 0{,}00032) = 657{,}23^0 C;$$

$$t_{w3} = t_{f1} - q_б (R_1 + R_3 + R_4) = 1200 - 82614(0{,}00625 + 0{,}00032 + 0{,}005) = 244{,}16^0 C.$$

Произведём расчеты для случая «в» - стенка стальная со стороны воды покрыта слоем накипи, на накипи дополнительно слой масла (рисунок 11)

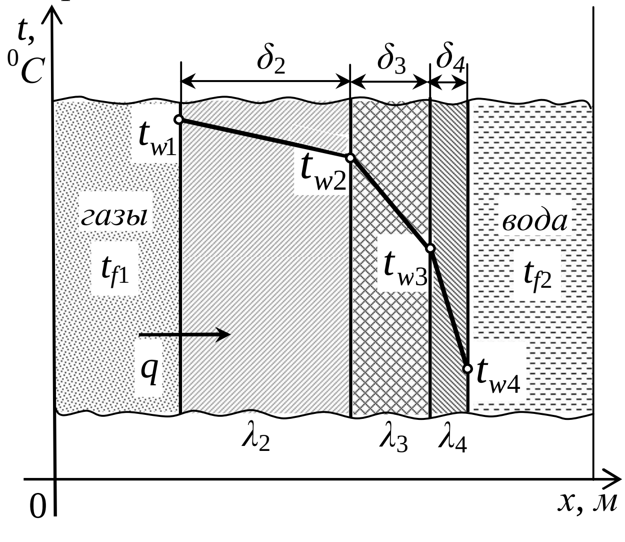

Рисунок 11 - Теплопроводность многослойной плоской стенки (случай «в»)

Термическое сопротивление

- от газов к стенке

$$R_1 = \frac{1}{\alpha_1} = \frac{1}{160} = 0{,}00625 \frac{(м^2 К)}{Вт};$$

- от стенки к кипящей воде

$$R_2 = \frac{1}{\alpha_2} = \frac{1}{3500} = 0{,}000285 \frac{(м^2 К)}{Вт};$$

- стальной стенки котла

$$R_3 = \frac{\delta_2}{\lambda_2} = \frac{0{,}016}{50} = 0{,}00032 \frac{(м^2 К)}{Вт};$$

- слоя накипи

$$R_4 = \frac{\delta_3}{\lambda_3} = \frac{0{,}01}{2} = 0{,}005 \frac{(м^2 К)}{Вт};$$

- слоя масла

$$R_5 = \frac{\delta_4}{\lambda_4} = \frac{0{,}001}{0{,}1} = 0{,}01 \frac{(м^2 К)}{Вт};$$

Определяем коэффициент теплопередачи стенки для случая «в»

$$h_в = \frac{1}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5} = \frac{1}{0{,}00625 + 0{,}000286 + 0{,}00032 + 0{,}005 + 0{,}01} =$$

$$= 45{,}8 \frac{Вт}{(м^2 К)};$$

Находим количество теплоты

$$q_в = h_в (t_{f1} - t_{f2}) = 45{,}8(1200 - 220) = 44884 \frac{Вт}{м^2} \text{ (31,4% от случая «а»).}$$

Температура слоёв стенки

$$t_{w1} = t_{f1} - q_в R_1 = 1200 - 44884 \cdot 0{,}00625 = 919{,}48^0 C;$$

$$t_{w_2} = t_{f1} - q_в (R_1 + R_3) = 1200 - 44884(0{,}00625 + 0{,}00032) = 905{,}11^0 C;$$

$$t_{w3} = t_{f1} - q_в (R_1 + R_3 + R_4) = 1200 - 44884(0{,}00625 + 0{,}00032 + 0{,}005) = 680{,}69^0 C;$$

$$t_{w4} = t_{f2} + q_в R_2 = 220 + 44884 \cdot 0{,}000285 = 232{,}79^0 C.$$

Случай «г» - стенка стальная со стороны воды покрыта слоем накипи, на накипи слой масла, со стороны газов на стенке слой сажи (рисунок 12)

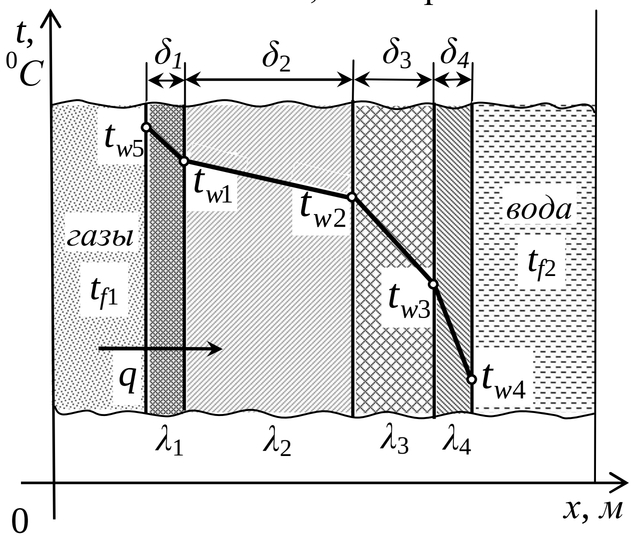

Рисунок 11 - Теплопроводность многослойной плоской стенки (случай «г»)

Термическое сопротивление

- от газов к стенке

$$R_1 = \frac{1}{\alpha_1} = \frac{1}{160} = 0{,}00625 \frac{(м^2 К)}{Вт};$$

- от стенки к кипящей воде

$$R_2 = \frac{1}{\alpha_2} = \frac{1}{3500} = 0{,}000285 \frac{(м^2 К)}{Вт};$$

- стальной стенки котла

$$R_3 = \frac{\delta_2}{\lambda_2} = \frac{0{,}016}{50} = 0{,}00032 \frac{(м^2 К)}{Вт};$$

- слоя накипи

$$R_4 = \frac{\delta_3}{\lambda_3} = \frac{0{,}01}{2} = 0{,}005 \frac{(м^2 К)}{Вт};$$

- слоя масла

$$R_5 = \frac{\delta_4}{\lambda_4} = \frac{0{,}001}{0{,}1} = 0{,}01 \frac{(м^2 К)}{Вт};$$

- слоя сажи

$$R_6 = \frac{\delta_1}{\lambda_1} = \frac{0{,}001}{0{,}2} = 0{,}005 \frac{(м^2 К)}{Вт}.$$

Определяем коэффициент теплопередачи стенки

$$h_г = \frac{1}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6} =$$

$$= \frac{1}{0{,}00625 + 0{,}000286 + 0{,}00032 + 0{,}005 + 0{,}01 + 0{,}005} = 37{,}2 \frac{Вт}{(м^2 К)}.$$

Находим количество теплоты

$$q_г = h_г(t_{f1} - t_{f2}) = 37{,}2(1200 - 220) = 36456\frac{Вт}{м^2} \quad \text{(25,4\% от случая «а»).}$$

Определяем температуру слоёв стенки

$$t_{w5} = t_{f1} - q_г R_1 = 1200 - 36456 \cdot 0{,}00625 = 972{,}15^0 C;$$

$$t_{w1} = t_{f1} - q_г(R_1 + R_6) = 1200 - 36456(0{,}00625 + 0{,}005) = 789{,}87^0 C;$$

$$t_{w2} = t_{f1} - q_г(R_1 + R_6 + R_3) = 1200 - 36456(0{,}00625 + 0{,}005 + 0{,}00032) = 778{,}20^0 C;$$

$$t_{w3} = t_{f2} + q_г(R_2 + R_5) = 220 + 36456(0{,}000285 + 0{,}01) = 545{,}95^0 C;$$

$$t_{w4} = t_{f2} + q_г R_2 = 220 + 36456 \cdot 0{,}000285 = 230{,}39^0 C.$$

4 КОНВЕКТИВНЫЙ ТЕПЛООБМЕН

4.1 Методические указания

4.1.1 Общие понятия и определения

Конвекция – перенос тепла из одной части пространства в другую перемещающейся жидкостью или газом.

Конвекция может быть свободной и вынужденной. Свободная конвекция происходит вследствие разности плотностей холодных и нагретых слоев жидкости, вынужденная – под действием внешних сил (ветер, вентилятор).

Неотъемлемой частью конвекции является теплопроводность между соприкасающимися частицами. Совместный процесс конвекции тепла и теплопроводности называется конвективным теплообменом. При излучении конвективного теплообмена под жидкостью понимают помимо капельных жидкостей и газы.

При малых скоростях движения получается струйный характер течения – ламинарный режим, при больших – неупорядоченно-вихревоой –турбулентный режим. Но при турбулентном движении у стенок канала сохраняется ламинарный слой. Толщина слоя зависит от скорости движения и вязкости жидкости.

В ламинарном слое тепло передается теплопроводностью, т.е. можно применить закон Фурье

$$q = -\lambda \frac{dt}{dn},$$

где λ - коэффициент теплопроводности теплоносителя *Вт*/(*м·К*),

n – нормаль к поверхности.

Удельный тепловой поток пропорционален температурному градиенту.

В слое толщиной δ температура изменяется от $t_{ж}$ до $t_{ст}$. Температурный градиент у поверхности можно выразить уравнением:

$$grad\ t = \frac{dt}{dn} \cong \frac{t_{ж} - t_{ст}}{\delta} = \frac{\Delta t}{\delta},$$

Тогда $q = \dfrac{\lambda}{\delta}\Delta t$ *Вт/м*^{2}.