

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ПРАКТИЧЕСКИМ ЗАНЯТИЯМ ПО
ДИСЦИПЛИНЕ

«Термодинамика и теплотехника»

для студентов специальности 21.05.06 Нефтегазовая техника и технологии
специализации «Технология бурения нефтяных и газовых скважин»

Ставрополь, 2026

Практическое занятие № 1

Рабочее тело, идеальный газ. Параметры состояния рабочего тела.

1.1 Формулировка задания и исходные данные для расчета

Смесь, состоящая из M_1 киломолей азота и M_2 киломолей кислорода с начальными параметрами $P_1=1\text{ МПа}$ и $T_1=1000\text{ К}$ расширяется до давления P_2 . Расширение может осуществляться по изотерме, адиабате и политропе с показателем n . Определить газовую постоянную смеси, ее массу и начальный объем, конечные параметры смеси, работу расширения и теплоту, участвующую в процессе.

Дать сводную таблицу результатов и ее анализ. Показать процессы на PV и TS диаграммах.

Указание: Показатель адиабаты, а следовательно и теплоемкости принять постоянными, не зависящими от температуры.

Исходные данные к задаче

$$M_1=0,3\text{ кмоль};$$

$$M_2=0,7\text{ кмоль};$$

$$P_2=0,43\text{ МПа};$$

$$n=1,2.$$

1.2 Последовательность выполнения задания

1. Газовая постоянная смеси

$$R_{\text{н}} = \sum R_i \cdot g_i;$$

$$R_i = \frac{\mu R}{\mu_i} = \frac{8314}{\mu_i};$$

$$R_{N_2} = \frac{8314}{2 \cdot 14} = 296,9 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}};$$

$$R_{O_2} = \frac{8314}{2 \cdot 16} = 259,8 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}};$$

$$d_i = r_i = g_i \frac{\mu_{CM}}{\mu_i}; \quad g_i = r_i \frac{\mu_i}{\mu_{CM}};$$

$$\mu_{CM} = \sum_{i=1}^n \mu_i r_i = 28 \cdot 0,3 + 32 \cdot 0,7 = 30,8 \text{ кг/кмоль}.$$

Массовая доля азота:

$$g_{N_2} = 0,3 \cdot \frac{28}{30,8} = 0,27;$$

Массовая доля кислорода:

$$g_{O_2} = 0,7 \cdot \frac{32}{30,8} = 0,73;$$

$$R_{CM} = 296,9 \cdot 0,27 + 259,8 \cdot 0,73 = 269,79 \text{ Дж/(кг·К)}$$

2. Масса смеси:

$$m_{CM} = M \cdot \mu_{CM} = (0,3 + 0,7) \cdot 30,8 = 30,8 \text{ кг}.$$

3. Начальный объем смеси:

$$V_{CM} = v_{CM} \cdot m_{CM} = 0,27 \cdot 30,8 = 8,31 \text{ м}^3,$$

где

$$P_{CM} \cdot v_{CM} = R_{CM} \cdot T_{CM} \longrightarrow v_{CM} = \frac{R_{CM} \cdot T_{CM}}{P_{CM}} = \frac{269,79 \cdot 1000}{1 \cdot 10^6} = 0,27 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

4. Конечные параметры смеси в зависимости от вида термодинамического процесса.

4.1. Изотермический процесс ($T = \text{const}$).

$$P_1 \cdot v_1 = P_2 \cdot v_2 \longrightarrow v_2 = \frac{P_1 \cdot v_1}{P_2} = \frac{1 \cdot 0,27}{0,43} = 0,63 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

$$T_1 = T_2 = 1000 \text{ К}.$$

4.2. Адиабатный процесс (без подвода и отвода тепла).

$$dq = 0, \quad pv^k = \text{const}, \quad k = \frac{C_p}{C_v}.$$

$$C_p = \frac{\mu C_p}{\mu_{см}} = \frac{\sum \mu C_{pi} g_i}{\mu_{см}} = \frac{32,245 \cdot 0,73 + 30,42 \cdot 0,27}{30,8} = 1,03 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

$$C_v = C_p - R_{см} = 0,76 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Показатель адиабаты:

$$K = \frac{C_p}{C_v} = \frac{1,03}{0,76} = \frac{23,93 \cdot 0,73 + 22,106 \cdot 0,27}{30,8} = 1,36.$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^K \longrightarrow v_2 = v_1 \cdot \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{1/K} = 0,27 \cdot \left(\frac{1}{0,43} \right)^{1/1,36} = 0,5 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

$$\frac{P_1 \cdot v_1}{P_2 \cdot v_2} = \frac{T_1}{T_2} \longrightarrow \frac{v_1}{v_2} \cdot \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^K = \frac{T_1}{T_2} \longrightarrow \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{1-K} = \frac{T_1}{T_2};$$

$$T_2 = T_1 \cdot \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^{1-K} = 1000 \cdot \left(\frac{0,5}{0,27} \right)^{1-1,36} = 801 \text{ К};$$

4.3. Политропный процесс.

$$pv = \text{const}.$$

$$v_2 = v_1 \cdot \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{1/n} = 0,27 \cdot \left(\frac{1}{0,43} \right)^{1/1,2} = 0,55 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

$$T_2 = T_1 \cdot \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^{1-n} = 1000 \cdot \left(\frac{0,55}{0,27} \right)^{1-1,2} = 869 \text{ К};$$

4.5. Изменение внутренней энергии смеси:

$$\Delta U_{1-2} = C_v \cdot (T_2 - T_1);$$

- изотермический: $\Delta U_{1-2} = 0$ т.к. $T_2 = T_1$;
- адиабатный: $\Delta U_{1-2} = 0,76 \cdot (801 - 1000) = -151,24 \text{ кДж/кг}$;

- политропный: $\Delta U_{1-2} = 0,76 \cdot (869 - 1000) = -99,56 \text{ кДж/кг}$.

4.6. Изменение энтальпии смеси:

$$\Delta i_{1-2} = C_p \cdot (T_2 - T_1);$$

- изотермический: $\Delta i_{1-2} = 0 \text{ т.к. } T_2 = T_1$;
- адиабатный: $\Delta i_{1-2} = 1,03 \cdot (801 - 1000) = -204,97 \text{ кДж/кг}$;
- политропный: $\Delta i_{1-2} = 1,03 \cdot (869 - 1000) = -134,93 \text{ кДж/кг}$.

4.7. Изменение энтропии смеси:

- изотермический: $\Delta S_{1-2} = R \cdot \ln \frac{v_2}{v_1} = 269,79 \cdot \ln \frac{0,63}{0,27} = 229 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$;
- адиабатный: $\Delta S_{1-2} = 0 \text{ т.к. тепло не подводится и не отводится}$;
- политропный: $\Delta S_{1-2} = C \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} = C_v \cdot \frac{n-k}{n-1} \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} =$

$$= 0,76 \cdot \frac{1,2-1,36}{1,2-1} \cdot \ln \frac{869}{1000} = 0,09 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

4.8. Работа расширения и теплота, участвующая в процессе:

- изотермический:

$$l_{1-2} = R \cdot T \cdot \ln \frac{P_1}{P_2} = 269,79 \cdot 1000 \cdot \ln \frac{1}{0,43} = 227695 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}};$$

$$q_{1-2} = T \cdot (S_2 - S_1) = 1000 \cdot 229 = 229000 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}};$$

- адиабатный:

$$l_{1-2} = \frac{1}{k-1} \cdot (P_1 \cdot v_1 - P_2 \cdot v_2) = \frac{R}{k-1} \cdot (T_1 - T_2) =$$

$$= \frac{269,79}{1,36-1} \cdot (1000 - 801) = 149134 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}};$$

$$q_{1-2} = 0;$$

- политропный:

$$l_{1-2} = \frac{R}{n-1} \cdot (T_1 - T_2) = \frac{269,79}{1,2-1} \cdot (1000 - 869) = 176713 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}};$$

$$q_{1-2} = C_v \cdot \frac{n-k}{n-1} \cdot (T_2 - T_1) = 0,76 \cdot \frac{1,2-1,36}{1,2-1} \cdot (869 - 1000) = 80 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}};$$

Проверка для каждого процесса.

$$q = \Delta Q + l.$$

Таблица исходных данных

№ варианта	M ₁ , кМоль	M ₂ , кМоль	p ₂ , МПа	n
1	0,2	0,8	0,34	0,9
2	0,3	0,7	0,37	1,1
3	0,1	0,9	0,31	1,3
4	0,4	0,6	0,27	1,2
5	0,6	0,4	0,39	0,8
6	0,8	0,2	0,41	0,6
7	0,9	0,1	0,46	0,7
8	0,7	0,3	0,44	1,4
9	0,5	0,5	0,29	1,3
10	0,2	0,8	0,33	0,8
11	0,4	0,6	0,38	0,5
12	0,8	0,2	0,35	0,9
13	0,1	0,9	0,26	0,7
14	0,5	0,5	0,23	1,1
15	0,8	0,2	0,43	1,5
16	0,3	0,7	0,40	1,2
17	0,7	0,3	0,48	0,8
18	0,2	0,8	0,37	1,3
19	0,6	0,4	0,32	1,2
20	0,9	0,1	0,27	1,4
21	0,1	0,9	0,24	0,7
22	0,5	0,5	0,44	0,5
23	0,3	0,7	0,47	0,3
24	0,2	0,8	0,36	0,6
25	0,4	0,6	0,31	0,4
26	0,6	0,4	0,45	1,2
27	0,7	0,3	0,49	0,9
28	0,9	0,1	0,33	1,1
29	0,2	0,8	0,25	1,5
30	0,4	0,6	0,28	1,3

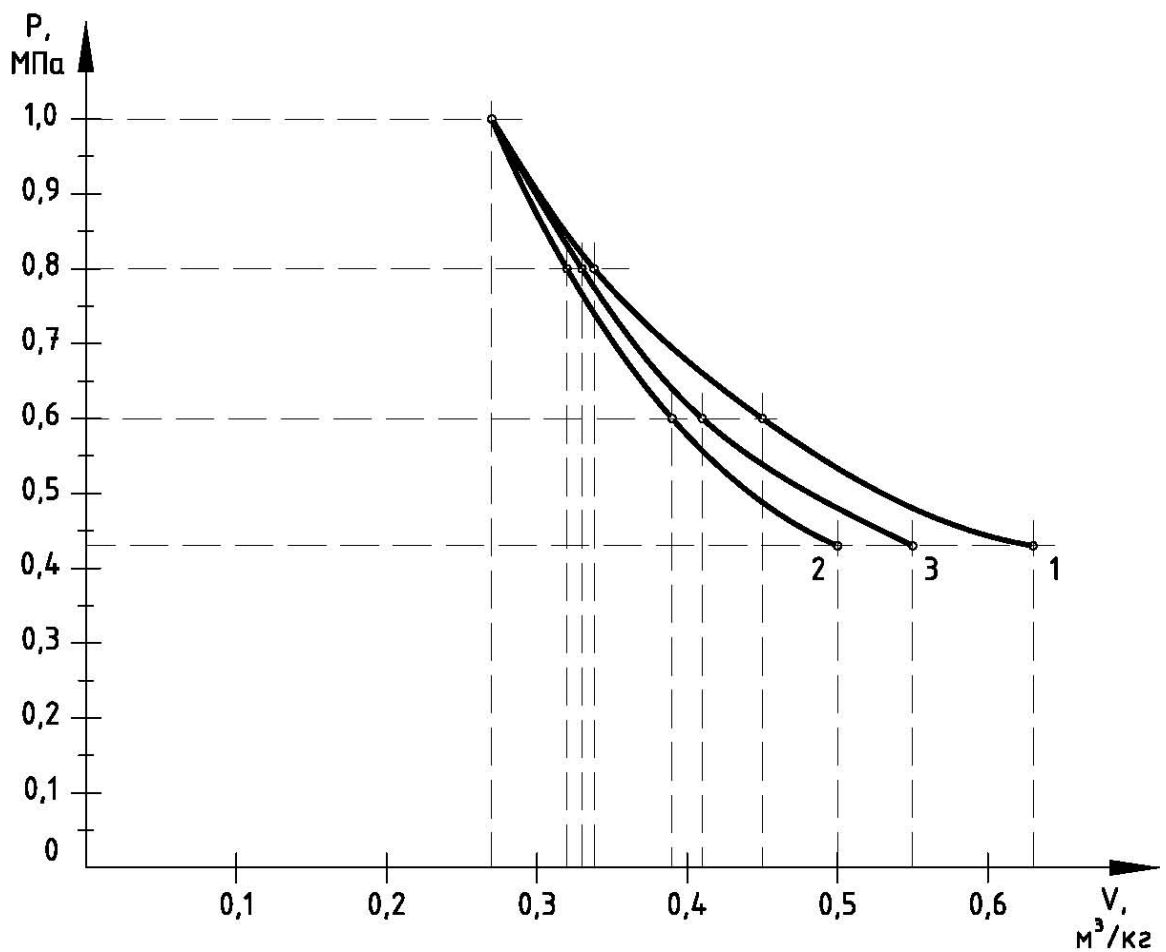


Рисунок 1. $P-v$ диаграмма

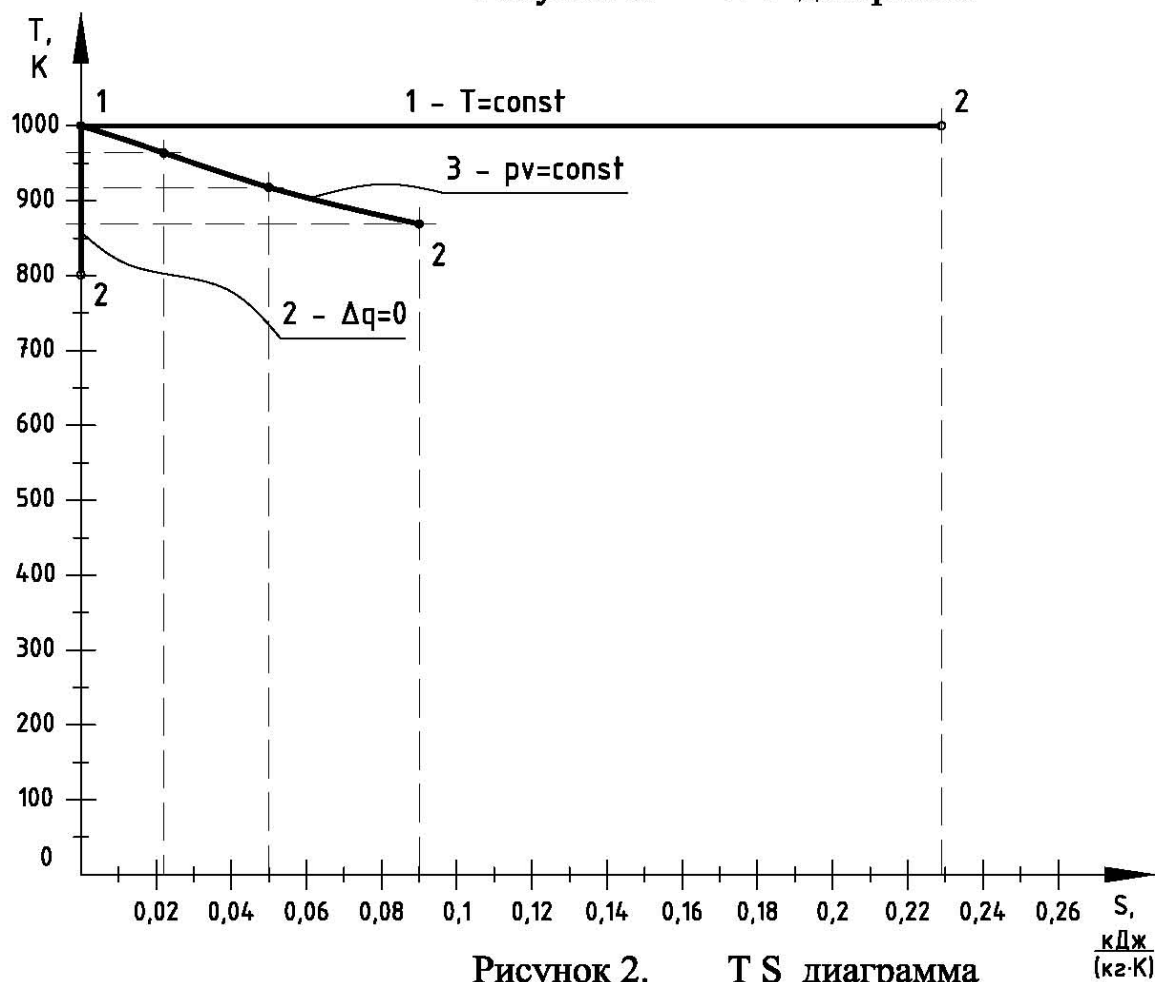


Рисунок 2. $T-S$ диаграмма

Практическое занятие № 2

РАСЧЕТ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

2.1 Формулировка задания и исходные данные для расчета

Боковая плоская стенка топочной камеры выполнена из четырех слоев. Первый слой из шамотного кирпича (толщина слоя δ_1), второй - из огнеупорной изоляции диатомит (толщина слоя δ_2), третий - основной изоляционный слой - шлаковые плиты (толщина слоя δ_3), четвертый - защитная штукатурка (толщина слоя δ_4).

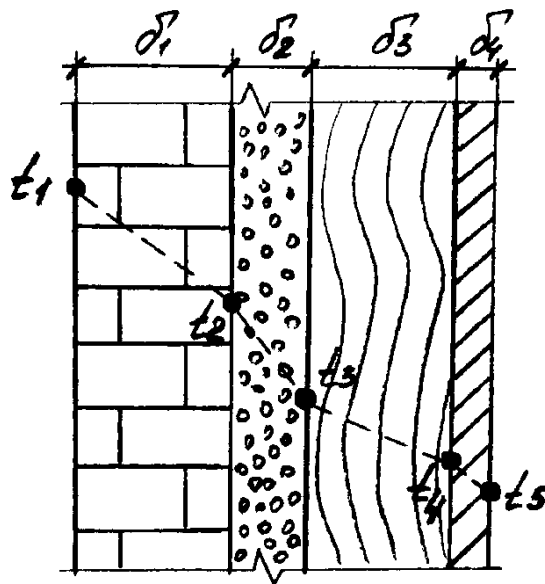
1. Определить требуемую толщину основного слоя изоляции ($\delta_3=?$), при заданной температуре на внутренней поверхности стенки t_1 , на наружной поверхности стенки t_5 и тепловом потоке через стенку q .
2. Построить график изменения температуры в этом слое изоляции.

Таблица 1 – Исходные данные

№№ <i>n/n</i>	Размеры стены, мм			q_0 , <i>Вт/м²</i>	№№ <i>n/n</i>	t_1 , °C	t_5 , °C	q_m , <i>Вт/м²</i>
	δ_1	δ_2	δ_4					
1	2	3	4	5	1	2	3	4
1	200	40	30	400	1	900	30	800
2	220	50	20	440	2	950	40	750
3	240	30	20	480	3	1000	50	850
4	180	60	30	520	4	850	30	700
5	260	30	10	560	5	800	40	870
6	280	20	10	380	6	920	50	680
7	300	20	10	420	7	980	30	650
8	250	40	20	360	8	820	40	780
9	150	60	30	460	9	880	50	830
0	320	20	10	340	0	940	40	770

Общие исходные данные: $\lambda_1=0,81(1+0,0008t)$, $\lambda_2=0,13 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$,
 $\lambda_3=0,046(1+0,0048t)$, $\lambda_4=0,38 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$

2.2 Последовательность выполнения задания



$\delta_1 =$
 $\delta_2 =$
 $\delta_3 =$
 $\delta_4 =$
 $t_1 =$
 $q_0 =$

$\lambda_1 =$
 $\lambda_2 =$
 $\lambda_3 =$
 $\lambda_4 =$
 $t_5 =$
 $q_m =$

Удельный тепловой поток через многослойную плоскую стенку определяется выражением:

Рисунок 1 - Эскиз
 боковой стенки топочной
 камеры

$$q_0 = \frac{t_1 - t_5}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4},$$

откуда

$$R_3 = \frac{\delta_3}{\lambda_3} = \frac{t_1 - t_5}{q_0} - (R_1 + R_2 + R_4)$$

и требуемое значение толщины изоляционного слоя:

$$\delta_3 = \lambda_3 \left[\frac{t_1 - t_5}{q_0} - (R_1 + R_2 + R_4) \right]$$

Термическое сопротивление отдельных слоев стенки топки равны:

$$R_1 = \frac{\delta_1}{\lambda_1}, \quad R_2 = \frac{\delta_2}{\lambda_2} \quad \text{и} \quad R_4 = \frac{\delta_4}{\lambda_4}$$

Коэффициенты теплопроводности 1-го и 3-го слоя определяют по средней температуре в данном слое равной:

$$t_1^{cp} = 0,5(t_1 + t_2) \text{ и } t_3^{cp} = 0,5(t_3 + t_4)$$

Температуры t_2 , t_3 , и t_4 определяют из уравнений:

$$t_2 = \sqrt{\left(\frac{1}{b_1} + t_1\right)^2 - \frac{2q_0\delta_1}{b_1\lambda_{10}}} - \frac{1}{b_1},$$

$$t_3 = t_2 - q_0 R_2,$$

$$t_4 = t_5 + q_0 R_4,$$

где - λ_{10} и b_1 - коэффициенты в уравнении переменного коэффициента теплопроводности 1-го слоя.

Найденное значение толщины слоя изоляции δ_3 округляют до ближайшего большего значения, кратного 0,01 м.



Рисунок 2 – График изменения температуры

λ_{30} и b_3 - коэффициенты в уравнении переменного коэффициента теплопроводности изоляционного слоя: $\lambda_3 = \lambda_{30}(1 + b_3 t_x^{cp})$

t_3 - температура на наружной поверхности слоя со стороны входа потока тепла q_0 , °

Практическое занятие № 3

РАСЧЕТ ПРОЦЕССОВ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА

3.1 Формулировка задания и исходные данные для расчета

Трубопровод горячей воды проложен горизонтально по опорам над поверхностью земли. Наружный воздух с температурой t_2 и скоростью ветра w_2 обдувает трубопровод под углом атаки ψ . Температура горячей воды в трубопроводе t_1 , скорость течения w_1 .

1. Определить удельную потерю тепла от неизолированного трубопровода и снижение температуры горячей воды на длине трубопровода $l=1000$ м.

2. Определить требуемую толщину основного слоя изоляции ($\delta_1=?$) при нормативной удельной потере тепла q_0 и снижение температуры воды на длине трубопровода 1000 м. Изоляция двухслойная, основной слой - минераловатные плиты, наружный защитный слой - асбоцементная штукатурка, толщиной δ_2 .

Таблица 2 – Исходные данные

№№ n/n	Размеры трубы, мм		t_1 °C	w_1 м/с	№№ n/n	t_2 °C	w_2 м/с	ψ	q_0 Вт/м
	$d_{нар}$	$\delta_{ст}$							
1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
1	133	6,5	158	1,2	1	-18	6	90	180
2	159	7	160	1,1	2	-20	7	80	160
3	194	7	154	1,0	3	-22	8	70	140
4	219	8	152	0,9	4	-24	9	60	200
5	273	8	150	1,3	5	-26	10	50	210
6	325	9	148	1,4	6	-28	11	40	190
7	377	9	146	1,5	7	-30	12	55	170
8	426	10	144	1,6	8	-32	14	65	150
9	529	12	142	1,3	9	-25	15	75	220
0	273	8	160	1,0	0	-35	5	85	140

Общие исходные данные: $\lambda_1=0,06+0,00019t$, $\lambda_2=0,3$ Вт/(м·К),
 $\delta_2=20$ мм, $\lambda_{ст}=42$ Вт/(м·К).

3.2 Последовательность выполнения задания

Исходные данные:

$$\begin{aligned} d_n &= & t_2 &= \\ \delta_{cm} &= & W_2 &= \\ t_1 &= & \lambda_1 &= \\ W_1 &= & \lambda_2 &= \\ \lambda_{cm} &= & \delta_2 &= \\ \psi &= \end{aligned}$$

1 часть

Удельный тепловой поток потерь теплоты на 1 погонный метр длины неизолированного трубопровода равен

$$q_{1n} = \frac{t_1 - t_2}{R_{\alpha 1} + R_{\lambda cm} + R_{\alpha 2}}, \quad \text{Вт/м}$$

где

$$R_{\alpha 1} = \frac{1}{\pi d_{\text{вн}} \alpha_1}, \quad R_{\lambda cm} = \frac{1}{2\pi \lambda_{cm}} \ln\left(\frac{d_{\text{нар}}}{d_{\text{вн}}}\right),$$

$$R_{\alpha 2} = \frac{1}{\pi d_{\text{нар}} \alpha_{2\psi}} \quad \text{и} \quad d_{\text{вн}} = d_{\text{нар}} - 2\delta_{cm}$$

- термические сопротивления при теплопередаче от воды к наружному воздуху через стенку трубы.

Снижение температуры горячей воды на длине трубопровода l , м, определяется выражением:

$$\Delta t_1(l) = \frac{q_{1n} l}{C_1 G_1}$$

где $G_1 = \frac{W_1 \pi d_{\text{вн}}^2 \cdot \rho_1}{4}$, кг/с - расход воды в трубопроводе;

C_1 - теплоемкость воды в трубопроводе при ее начальной температуре

$t = t_1$, Дж/кг · К

ρ_1 – плотность воды при температуре $t = t_1$, кг/м³

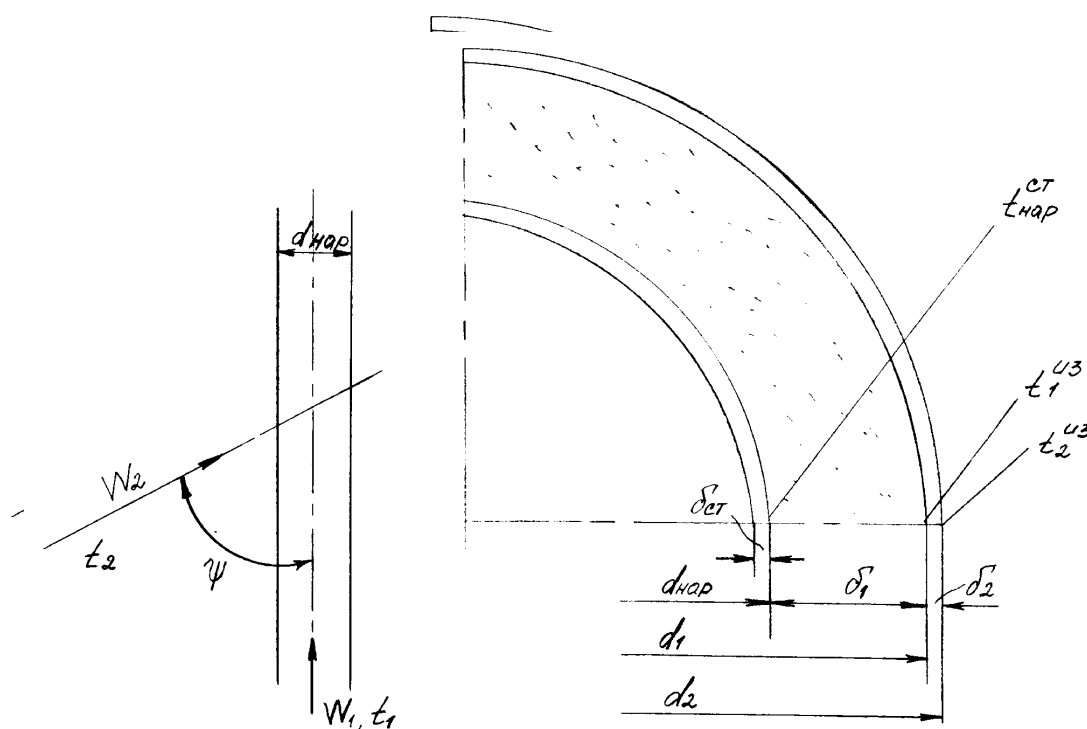


Рисунок 3 - Эскиз расположения трубопровода и тепловой изоляции на трубе

Коэффициент теплоотдачи от воды к внутренней поверхности стенки трубы α_1 определяют по критериальному уравнению для турбулентного режима течения жидкости внутри трубы (при $Re > 10^4$):

$$Nu = 0,021 Re^{0,8} Pr^{0,43}$$

где
$$Nu = \frac{\alpha_1 d_{\text{вн}}}{\lambda}, \quad Re = \frac{W_1 d_{\text{вн}}}{\nu}, \quad Pr = \frac{\nu}{a} \quad -$$

критерии подобия Нуссельта, Рейнольдса и Прандтля, соответственно;

- λ, ν, a - физические параметры воды, определяемые при ее температуре $t = t_1$

Средний коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности трубы к воздуху α_2 при поперечном обтекании под углом атаки ψ определяют из критериального уравнения (при $Re = 1 \cdot 10^3 - 2 \cdot 10^5$):

$$Nu = 0,25 Re^{0,6} Pr^{0,38}$$

где Re , Pr , Nu - критерии подобия для воздуха, берутся по формулам указанным выше и определяются по скорости воздуха W_2 , температуре t_2 и наружному диаметру трубы d_n .

При обтекании трубы под углом атаки ψ учитывается поправочный коэффициент ε_ψ : $\alpha_{2\psi} = \overline{\alpha_2} \varepsilon_\psi$

ψ°	.	.	.	.	90	80	70	60	50	40	30
ε_ψ	.	.	.	.	1	1	0,99	0,93	0,87	0,76	0,66

Физические свойства воды на линии насыщения [2 и 13]

$t, ^\circ\text{C}$	$p \cdot 10^{-5}, \text{Па}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$i, \text{кДж/кг}$	$c_p, \text{кДж/(кг} \cdot ^\circ\text{C)}$	$\lambda \cdot 10^2, \text{Вт/(м} \cdot ^\circ\text{C)}$	$\alpha \cdot 10^8, \text{м}^2/\text{с}$	$\mu \cdot 10^6, \text{Па} \cdot \text{с}$	$\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	$\beta \cdot 10^4, \text{K}^{-1}$	$\sigma \cdot 10^4, \text{Н/м}$	Pr
0	1,013	999,9	0,00	4,212	55,1	13,1	1788	1,789	-0,63	756,4	13,67
10	1,013	999,7	42,04	4,191	57,4	13,7	1306	1,306	+0,70	741,6	9,52
20	1,013	998,2	83,91	4,183	59,9	14,3	1004	1,005	1,82	726,9	7,02
30	1,013	995,7	125,7	4,174	61,8	14,9	801,5	0,805	3,21	712,2	5,42
40	1,013	992,2	167,5	4,174	63,5	15,3	653,3	0,659	3,87	696,5	4,31
50	1,013	988,1	209,3	4,174	64,8	15,7	549,4	0,556	4,49	676,9	3,54
60	1,013	983,2	251,1	4,179	65,9	16,0	469,9	0,478	5,11	662,2	2,98
70	1,013	977,8	293,0	4,187	66,8	16,3	406,1	0,415	5,70	643,5	2,55
80	1,013	971,8	335,0	4,195	67,4	16,6	355,1	0,365	6,32	625,9	2,21
90	1,013	965,3	377,0	4,208	68,0	16,8	314,9	0,326	6,95	607,2	1,95
100	1,013	958,4	419,1	4,220	68,3	16,9	282,5	0,295	7,52	588,6	1,75
110	1,43	951,0	461,4	4,233	68,5	17,0	259,0	0,272	8,08	569,0	1,60
120	1,98	943,1	503,7	4,250	68,6	17,1	237,4	0,252	8,64	548,4	1,47
130	2,70	934,8	546,4	4,266	68,6	17,2	217,8	0,233	9,19	528,8	1,36
140	3,61	926,1	589,1	4,287	68,5	17,2	201,1	0,217	9,72	507,2	1,26
150	4,76	917,0	632,2	4,313	68,4	17,3	186,4	0,203	10,3	486,6	1,17
160	6,18	907,4	675,4	4,346	68,3	17,3	173,6	0,191	10,7	466,0	1,10
170	7,92	897,3	719,3	4,380	67,9	17,3	162,8	0,181	11,3	443,4	1,05
180	10,03	886,9	763,3	4,417	67,4	17,2	153,0	0,173	11,9	422,8	1,00
190	12,55	876,0	807,8	4,459	67,0	17,1	144,2	0,165	12,6	400,2	0,96
200	15,55	863,0	852,5	4,505	66,3	17,0	136,4	0,158	13,3	376,7	0,93
210	19,08	852,8	897,7	4,555	65,5	16,9	130,5	0,153	14,1	354,1	0,91
220	23,20	840,3	943,7	4,614	64,5	16,6	124,6	0,148	14,8	331,6	0,89
230	27,98	827,3	990,2	4,681	63,7	16,4	119,7	0,145	15,9	310,0	0,88
240	33,48	813,6	1037,5	4,766	62,8	16,2	114,8	0,141	16,8	285,5	0,87
250	39,78	799,0	1085,7	4,844	61,8	15,9	109,9	0,137	18,1	261,9	0,86
260	46,94	784,0	1135,1	4,949	60,5	15,6	105,9	0,135	19,1	237,4	0,87
270	55,05	767,9	1185,3	5,070	59,0	15,1	102,0	0,133	21,6	214,8	0,88
280	64,19	750,7	1236,8	5,230	57,4	14,6	98,1	0,131	23,7	191,3	0,90
290	74,45	732,3	1290,0	5,485	55,8	13,9	94,2	0,129	26,2	168,7	0,93
300	85,92	712,5	1344,9	5,736	54,0	13,2	91,2	0,128	29,2	144,2	0,97
310	98,70	691,1	1402,2	6,071	52,3	12,5	88,3	0,128	32,9	120,7	1,03
320	112,90	667,1	1462,1	6,574	50,6	11,5	85,3	0,128	38,2	98,10	1,11
330	128,65	640,2	1526,2	7,244	48,4	10,4	81,4	0,127	43,3	76,71	1,22
340	146,08	610,1	1594,8	8,165	45,7	9,17	77,5	0,127	53,4	56,70	1,39
350	165,37	574,4	1671,4	9,504	43,0	7,88	72,6	0,126	66,8	38,16	1,60
360	186,74	528,0	1761,5	13,984	39,5	5,36	66,7	0,126	109	20,21	2,35
370	210,53	450,5	1892,5	40,321	33,7	1,86	56,9	0,126	264	4,709	6,79

Физические свойства сухого воздуха ($B=760$ мм рт. ст. $\approx$
 $\approx 1,01 \cdot 10^5$ Па) [13]

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$c_p, \text{кДж/}$ $(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$	$\lambda \cdot 10^2, \text{Вт/(м} \cdot ^\circ\text{C)}$	$\alpha \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	$\mu \cdot 10^6, \text{Па} \cdot \text{с}$	$\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	Pr
-50	1,584	1,013	2,04	12,7	14,6	9,23	0,728
-40	1,515	1,013	2,12	13,8	15,2	10,04	0,728
-30	1,453	1,013	2,20	14,9	15,7	10,80	0,723
-20	1,395	1,009	2,28	16,2	16,2	12,79	0,716
-10	1,342	1,009	2,36	17,4	16,7	12,43	0,712
0	1,293	1,005	2,44	18,8	17,2	13,28	0,707
10	1,247	1,005	2,51	20,0	17,6	14,16	0,705
20	1,205	1,005	2,59	21,4	18,1	15,06	0,703
30	1,165	1,005	2,67	22,9	18,6	16,00	0,701
40	1,128	1,005	2,76	24,3	19,1	16,96	0,699
50	1,093	1,005	2,83	25,7	19,6	17,95	0,698
60	1,060	1,005	2,90	26,2	20,1	18,97	0,696
70	1,029	1,009	2,96	28,6	20,6	20,02	0,694
80	1,000	1,009	3,05	30,2	21,1	21,09	0,692
90	0,972	1,009	3,13	31,9	21,5	22,10	0,690
100	0,946	1,009	3,21	33,6	21,9	23,13	0,688
120	0,898	1,009	3,34	36,8	22,8	25,45	0,686
140	0,854	1,013	3,49	40,3	23,7	27,80	0,684
160	0,815	1,017	3,64	43,9	24,5	30,09	0,682
180	0,779	1,022	3,78	47,5	25,3	32,49	0,681
200	0,746	1,026	3,93	51,4	26,0	34,85	0,680
250	0,674	1,038	4,27	61,0	27,4	40,61	0,677
300	0,615	1,047	4,60	71,6	29,7	48,33	0,674
350	0,566	1,059	4,91	81,9	31,4	55,46	0,676
400	0,524	1,068	5,21	93,1	33,0	63,09	0,678
500	0,456	1,093	5,74	115,3	36,2	79,38	0,687
600	0,404	1,114	6,22	138,3	39,1	96,89	0,699
700	0,362	1,135	6,71	163,4	41,8	115,4	0,706
800	0,329	1,156	7,18	188,8	44,3	134,8	0,713
900	0,301	1,172	7,63	216,2	46,7	155,1	0,717
1000	0,277	1,185	8,07	245,9	49,0	177,1	0,719
1100	0,257	1,197	8,50	276,2	51,2	199,3	0,722
1200	0,239	1,210	9,15	316,5	53,5	233,7	0,724

2 часть

Удельный тепловой поток потерь теплоты на 1 погонный метр длины изолированного трубопровода (многослойной цилиндрической стенки) равен:

$$q_{2n} = \frac{t_1 - t_2}{R_{\alpha 1} + R_{\lambda cm} + R_{\lambda 1} + R_{\lambda 2} + R_{\alpha 2}}$$

где
$$R_{\lambda 2} = \frac{1}{2\pi\lambda_2} \ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right)$$

- термическое сопротивление 2-го наружного слоя изоляции,

$$R_{\lambda 1} = \frac{1}{2\pi\lambda_1} \ln\left(\frac{d_1}{d_{нар}}\right)$$

- термическое сопротивление основного слоя изоляции,

$$R_{\alpha 2} = \frac{1}{\pi d_2 \alpha_2} \text{ - термическое сопротивление при теплоотдаче от}$$

наружного слоя изоляции к воздуху.

Значения $R_{\alpha 2}$ и $R_{\lambda cm}$ принимаются такими же, как и в 1 части работы.

Первоначально необходимо выбрать предварительное значение наружного диаметра трубопровода d_2 с основным слоем теплоизоляции с определяемой толщиной δ_1 и наружным слоем с заданной толщиной δ_2 из следующего диапазона:

$$1,5 d_{нар} \leq d_2 \leq 2,5 d_{нар}$$

После этого необходимо произвести расчет значений $R_{\lambda 1}$ и $R_{\lambda 2}$, приняв $d_1 = d_2 - 2\delta_2$.

Расчет значения коэффициента теплопроводности основного слоя изоляции произвести при среднем значении температуры $t_{1cp} = 0,5(t_1 + t_2)$

Коэффициент теплоотдачи α_2 рассчитывается аналогично, как и при отсутствии теплоизоляции, в качестве основного размера принимается наружный диаметр изолированного трубопровода d_2 .

После расчета значения плотности теплового потока потерь $q_{2п}$ производится проверка соответствия полученного значения следующему диапазону:

$$0,8q_0 \leq q_{2п} \leq q_0 .$$

В случае выхода рассчитанного значения за пределы данного диапазона необходимо изменить предварительное значение d_2 (не ограничиваясь предложенным диапазоном значений), после чего повторить заново расчет всех значений. Данный расчет необходимо проводить до получения искомого результата, т.е. соответствия значений $q_{2п}$ указанному диапазону.

Для облегчения всех расчетов рекомендуется воспользоваться программой Microsoft Excell.

Окончательное значение толщины слоя основной теплоизоляции определить из выражения: $\delta_1 = 0,5(d_1 - d_n)$

Практическое занятие № 4

РАСЧЕТ ТЕПЛООБМЕНА ИЗЛУЧЕНИЕМ.

4.1 Формулировка задания и исходные данные для расчета

Наружная часть боковой стенки топочной камеры из красного кирпича закрыта обшивкой из стального листа с зазором 30 мм, что позволят считать эти поверхности плоско-параллельными и пренебречь конвективным теплообменом между ними. Температуры кирпичной стенки t_1 , степень черноты ε_1 . Температура стальной обшивки t_2 , степень черноты ε_2 .

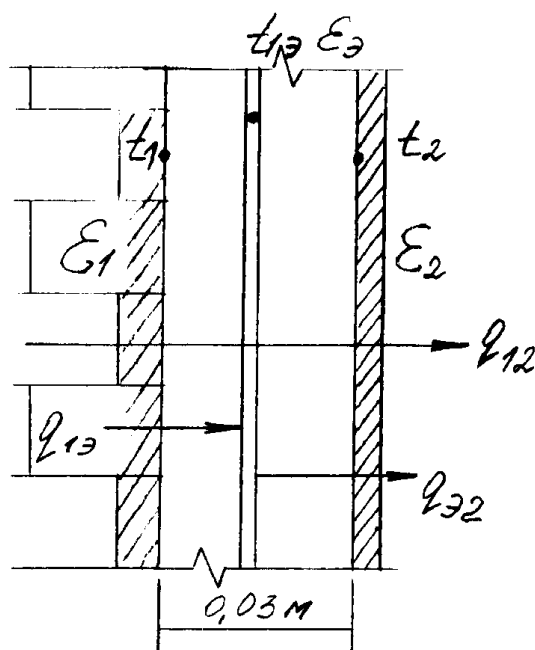
1. Определить удельный тепловой поток в окружающую среду за счет лучистого теплообмена между этими поверхностями, а также значение собственного, эффективного и отраженного излучения от обеих поверхностей.

2. Определить изменение указанных величин, если между указанными поверхностями разместить экран из алюминиевого листа со степенью черноты ε_3 .

Таблица 3 – Исходные данные

$N_0 N_0$ n/n	t_1 $^{\circ}\text{C}$	ε_1	ε_3	$N_0 N_0$ n/n	t_2 $^{\circ}\text{C}$	ε_2
1	2	3	4	1	2	3
1	110	0,88	0,11	1	36	0,70
2	120	0,82	0,12	2	32	0,72
3	130	0,84	0,13	3	34	0,74
4	140	0,86	0,14	4	36	0,76
5	150	0,90	0,15	5	38	0,78
6	115	0,92	0,16	6	40	0,80
7	125	0,91	0,17	7	42	0,73
8	135	0,89	0,18	8	44	0,75
9	145	0,87	0,19	9	46	0,77
0	155	0,85	0,15	0	48	0,79

4.2 Последовательность выполнения задания



Исходные данные

$t_1 =$ $t_2 =$
 $\varepsilon_1 =$ $\varepsilon_2 =$
 $\varepsilon_3 =$

Результирующий тепловой поток при теплообмене излучением между двумя параллельными поверхностями определяется из уравнения

$$q_{12} = E_{p1} = \varepsilon_{np12} C_0 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right], \quad \text{Вт/м}^2$$

Рисунок 4 - Эскиз разреза боковой стенки топочной камеры с обшивкой и экраном

где $T_1 = t_1 + 273$, $T_2 = t_2 + 273$ - абсолютные температуры первой и второй поверхности, К;

$C_0 = 5,67$ - коэффициент лучеиспускания для абсолютно черного тела, Вт/(м² К);

$$\varepsilon_{np12} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}, \text{ приведенная степень черноты системы 1-ой и}$$

2-ой поверхностей.

Собственное излучение каждой поверхности, их эффективное и отраженное излучение определяют из уравнений

$$\begin{aligned} E_{cob1} &= \varepsilon_1 C_0 \left(\frac{T_1}{100} \right)^4, & E_{\phi1} &= \frac{E_{cob1} + (1 - \varepsilon_1) E_{cob2}}{1 - (1 - \varepsilon_1)(1 - \varepsilon_2)} \\ E_{cob2} &= \varepsilon_2 C_0 \left(\frac{T_2}{100} \right)^4, & E_{\phi2} &= \frac{E_{cob2} + (1 - \varepsilon_2) E_{cob1}}{1 - (1 - \varepsilon_1)(1 - \varepsilon_2)} \\ E_{omp1} &= (1 - \varepsilon_1) E_{\phi2}, & E_{omp2} &= (1 - \varepsilon_2) E_{\phi1} \end{aligned}$$

При наличии между поверхностями одного плоского экрана результирующий тепловой поток будет равен

$$q_{12}^{\phi} = q_{1\phi} = q_{\phi2} = \frac{\varepsilon_{np1} \cdot \varepsilon_{np2}}{\varepsilon_{np1} + \varepsilon_{np2}} C_0 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right]$$

$$\text{где } \varepsilon_{np1} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_{\phi}} - 1}, \text{ приведенная степень черноты системы 1-ая}$$

поверхность - экран;

$$\varepsilon_{np2} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}, \text{ приведенная степень черноты системы экран - 2-ая}$$

поверхность.

Литература

Основная литература

1. Теплотехника: Учеб. для вузов/В.Н. Луканин, М.Г. Шатров, Г.М. Камфер и др.; Под ред В.Н. Луканина. – М. Высшая школа, 2012. – 671 с.
2. Кудинов В.А., Карташов Э.М. Техническая термодинамика.. Учеб. пособие для втузов. М.: Высш. шк., 2011. – 261 с.

Дополнительная литература

1. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. – Москва: Энергия, 1981. – 416 с.
2. Мурзаков В.В. Основы технической термодинамики. М., Энергия, 1973 г.
3. Вукалович М.П., Новиков И.И. Термодинамика. М., Машиностроение, 1972 г.
4. Юдаев Б.Н. Техническая термодинамика. Теплопередача. М., Высш. шк. 1988 г.
5. Теплотехнический справочник т.1, М., Энергия, 1975 г.
6. Рабинович О.М. Сборник задач по технической термодинамике. М., Машиностроение, 1973 г.
7. Ривкин С.Л., Александров А.А. Термодинамические свойства воды и водяного пара. М., Энергия, 1975 г.